



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STAVEBNÍ

FACULTY OF CIVIL ENGINEERING

ÚSTAV POZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

INSTITUTE OF BUILDING STRUCTURES

**TEPLOTNĚ VLHKOSTNÍ NAMÁHANÍ STĚNY
DŘEVOSTAVBY**

HYGROTHERMAL PROCESSES IN WALLS OF WOODEN HOUSES

DIPLOMOVÁ PRÁCE

DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Vencel

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. DAVID BEČKOVSKÝ, Ph.D.

BRNO 2017



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

FAKULTA STAVEBNÍ

Studijní program	N3607 Stavební inženýrství
Typ studijního programu	Navazující magisterský studijní program s prezenční formou studia
Studijní obor	3608T001 Pozemní stavby
Pracoviště	Ústav pozemního stavitelství

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

Student	Bc. Lukáš Vencel
Název	Teplotně vlhkostní namáhání stěny dřevostavby
Vedoucí práce	Ing. David Bečkovský, Ph.D.
Datum zadání	31. 3. 2016
Datum odevzdání	13. 1. 2017

V Brně dne 31. 3. 2016

prof. Ing. Miloslav Novotný, CSc.
Vedoucí ústavu

prof. Ing. Rostislav Drochytka, CSc.,
MBA
Děkan Fakulty stavební VUT

PODKLADY A LITERATURA

(1) Směrnice děkana č. 19/2011 s dodatkem a přílohami; (2) Katalogy a odborná literatura; (3) Stavební zákon č. 183/2006 Sb. ve znění zákona č. 350/2012 Sb.; (4) Vyhláška č. 499/2006 Sb. ve znění vyhlášky č. 62/2013 Sb.; (5) Vyhláška č. 268/2009 Sb.; (6) Vyhláška č. 398/2009 Sb.; (7) Platné normy ČSN, EN.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ

Zadání: Rámcové cíle práce jsou měření parametrů stavebních konstrukcí a studium procesů v nich probíhajících. Přesné stanovení cílů bude dohodnuto s vedoucím práce na základě odborné rozpravy v průběhu řešení teoretické části práce. **Výstupy:** VŠKP bude členěna v souladu se směrnicí děkana č. 19/2011 a jejím dodatkem a přílohami. Případné části dokumentace budou vloženy do složek s klopami formátu A4 opatřených popisovým polem a uvedením obsahu na vnitřní straně každé složky. Všechny části dokumentace budou zpracovány s využitím PC v textovém a grafickém CAD editoru. Výkresy budou opatřeny popisovým polem. Textová část bude obsahovat i položky h) "Úvod", i) "Vlastní text práce" j a j) "Závěr". VŠKP bude mít strukturu dle manuálu umístěného na www.fce.vutbr.cz/PST/Studium.

STRUKTURA DIPLOMOVÉ PRÁCE

VŠKP vypracujte a rozčleňte podle dále uvedené struktury:

1. Textová část VŠKP zpracovaná podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (povinná součást VŠKP).
2. Přílohy textové části VŠKP zpracované podle Směrnice rektora "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací" a Směrnice děkana "Úprava, odevzdávání, zveřejňování a uchovávání vysokoškolských kvalifikačních prací na FAST VUT" (nepovinná součást VŠKP v případě, že přílohy nejsou součástí textové části VŠKP, ale textovou část doplňují).

Ing. David Bečkovský, Ph.D.
Vedoucí diplomové práce

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá problematikou tepelně vlhkostního namáháním stěny dřevostavby, a s ní spojenou problematikou.

Byly vytypovány dvě bytové stavby, kde proběhlo experimentální měření vnitřního mikroklimatu, za účelem zjištění okrajových podmínek ohraničující běžně obvodové konstrukce.

Následně proběhla tepelně vlhkostní analýza čtyř běžně používaných konstrukcí dřevostaveb v České republice, pomocí různých numerických metod. Množství informací získaných z jednotlivých numerických metod byly jednotlivě analyzovány. Závěrečná část diplomové práce je věnována experimentálnímu měření difúzních vlastností materiálů. Jmenovitě foliové parozábrany, z hlediska vlivu její perforace na hodnotu faktoru difúzního odporu. Informace zjištěné z experimentu, byly aplikovány k opětovné numerické analýze u konstrukcí, které foliovou parozábranu obsahují. Následovalo porovnání obou případů, z hlediska změny tepelně vlhkostního chování konstrukce s vlivem perforace parozábrany.

KLÍČOVÁ SLOVA

Stěna dřevostavby, tepelně vlhkostní hodnocení, relativní vlhkost, teplota, vnitřní mikroklima, intenzita větrání, numerická analýza, experiment, difúze, kondenzace, rosný bod, parciální tlak, vodní pára.

ABSTRACT

This diploma thesis solves the problems of hydrothermal processes in walls of wooden houses and associated issues. A chosen were two apartment buildings, where they underwent exmerimental measurement of indor air, in order to determine the boundary conditions commonly boundary building evelope. Was followed by hygrothermal analysis of four commonly used constructions of wooden buildings in the Czech Republic, using various numerical methods. The quantity of information obtained from various numerical methods were analyzed individually.

The final part of the thesis is devoted to experimental measurements of diffusion properties of materials. Namely foil vapor barrier, in terms of its influence on the perforation vapor diffusion resistance factor. Information obtained from the experiments were applied to re numerical analysis for walls with a foil vapor barrier. Followed by comparing both cases, in terms of changes hygrothermal behavior of structures with influence of perforation of the vapor barrier.

KEYWORDS

Walls of wooden houses, hygrothermal assessment, the relative humidity, temperature, indoor microclimate, ventilation intensity, numerical analysis, experiment, diffusion, condensation, dew point, the partial pressure of water vapor.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE VŠKP

Bc. Lukáš Vencel *Teplotně vlhkostní namáhání stěny dřevostavby*. Brno, 2017. 110 s., 8 s. příl. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemního stavitelství. Vedoucí práce Ing. David Bečkovský, Ph.D.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje.

V Brně dne 13. 1. 2017

Bc. Lukáš Vencel
autor práce

PROHLÁŠENÍ O SHODĚ LISTINNÉ A ELEKTRONICKÉ FORMY VŠKP

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že elektronická forma odevzdané diplomové práce je shodná s odevzdanou listinnou formou.

V Brně dne 13. 1. 2017

Bc. Lukáš Vencel
autor práce

Tato diplomová práce byla zpracována s využitím infrastruktury Centra ADMas.

Poděkování:

Tímto bych chtěl poděkovat zejména svému vedoucí práce, Ing. Davidu Bečkovskému, Ph.D., za odborné vedení diplomové práce, cenné připomínky z praxe, trpělivost a věnovaný čas při konzultacích, které probíhaly vždy v přátelském duchu. V neposlední řadě však patří velké díky svým rodičům, kteří mi umožnili studium absolvovat.

V Brně dne 13.1.2017

Bc. Lukáš Vencel

Obsah

1	Úvod	11
2	Dřevostavby ve střední Evropě.....	12
3	DRUHY DŘEVOSTAVEB	16
3.1	Masivní stavby ze dřeva	16
3.2	Konstrukční systémy na bázi dřeva	18
4	Tepelně vlhkostní zátěž konstrukcí obecně	20
4.1	Šíření tepla	20
4.2	Šíření vlhkosti	21
5	Tepelně-vlhkostní mikroklima budov	25
5.1	Agencie ovlivňující vnitřní prostředí budov.....	25
5.2	Optimální teplota a vlhkost vnitřního prostředí.....	28
5.3	Způsob kontroly vnitřního prostředí.....	30
6	Optimalizace tepelně-vlhkostního mikroklimatu	32
7	Způsoby zajištění větrání budov	33
7.1	Bez nuceného větrání	33
7.2	Nucené větrání s využitím rekuperace tepla	36
7.3	LEGISLATIVA V OBLASTI VĚTRÁNÍ BUDOV	42
8	Vzduchotěsnost obálky budovy	44
9	Typy obvodových konstrukcí z hlediska tepelné techniky.....	46
9.1	Difúzně uzavřená konstrukce.....	46
9.2	Difúzně otevřená konstrukce	47
10	Netradiční stavební materiály pro současné stavby dřevostaveb.....	48
10.1	Sláma.....	48
10.2	Hlína	50
10.3	Konopí	50
10.4	Ovčí vlna	51
11	Cíle práce.....	52
12	Analýza vnitřního mikroklimatu bytových staveb	53
12.1	Metodika pro naplnění dílčího cíle	53
12.2	Dílčí výsledky experimentálního měření vnitřního mikroklimatu vybraných bytových staveb	56
13	Numerická analýza tepelně vlhkostní procesů v konstrukcích	69
13.1	Metodika pro naplnění dílčího cíle	69

13.2	Dílčí výsledky numerické analýzy tepelně vlhkostních procesů ve vybraných konstrukcích	80
14	Experimentální měření difúzních vlastností materiálů	96
14.1	Metodika pro naplnění dílčího cíle	96
14.2	Dílčí výsledky experimentálního měření difúzních vlastností foliové parozábrany s různou perforací	101
15	Závěr	105
16	Seznam použitých zdrojů	106
17	Seznam použitých zkratk a symbolů	109
18	Přílohy	111
18.1	Experimentální měření mikroklimatu	111
18.2	Numerické analýzy konstrukcí	115

1 Úvod

V dnešní době, kdy se nejen oblast stavebnictví ubírá směrem šetření energie, jak ve fázi výstavby, kdy se posuzuje množství vynaložené energie na výrobu konstrukčního materiálu, transport či samotnou realizaci na staveništi, tak i ve fázi užívání stavby, kde pozornost přesuneme spíše na množství potřebné energie na vytápění, chlazení, respektive energii potřebnou k zajištění tepelné pohody v objektu.

Nevýhodou dřevostaveb, respektive často diskutovaným tématem je šíření vlhkosti konstrukcí dřevostaveb. Vlhkost je nepřítelem staveb celkově ale co se týče dřevostaveb platí tohle pravidlo mnohonásobně více. Pokud se v takovýchto konstrukci vyskytuje vlhkost v téměř jakýkoliv formách, může to mít takřka fatální následky pro celou konstrukci. Existuje více variant, jak se právě na difúzi vodní páry u konstrukci staveb na bázi dřeva pohlíží. Právě obavy ze zasažení konstrukčního systému vlhkostí a tím snížení životnosti či zhoršení mikroklimatických podmínek v interiéru jsou tím největším strašákem i pro budoucí investory. Stavebnictví však v tomto směru dosti pokročilo, to se odráží samozřejmě i na zvyšujícím se počtu postavených dřevostaveb v České republice.

Všechny tyto aspekty mě vedly k tomu si vybrat jako téma diplomové práce právě dřevostavby, protože není snad jiného materiálu, který by byl šetrnější k životnímu prostředí ve všech fázích výstavby než dřevo.

Diplomová práce se zabývá tepelně vlhkostní zátěží různých typů obvodových plášťů dřevostaveb, respektive staveb na bázi dřeva, se zaměřením na svislé nosné obvodové konstrukce. Ve výběru jsou zástupci jak z řad difúzně otevřených konstrukcí, tak z řad difúzně uzavřených konstrukcí.

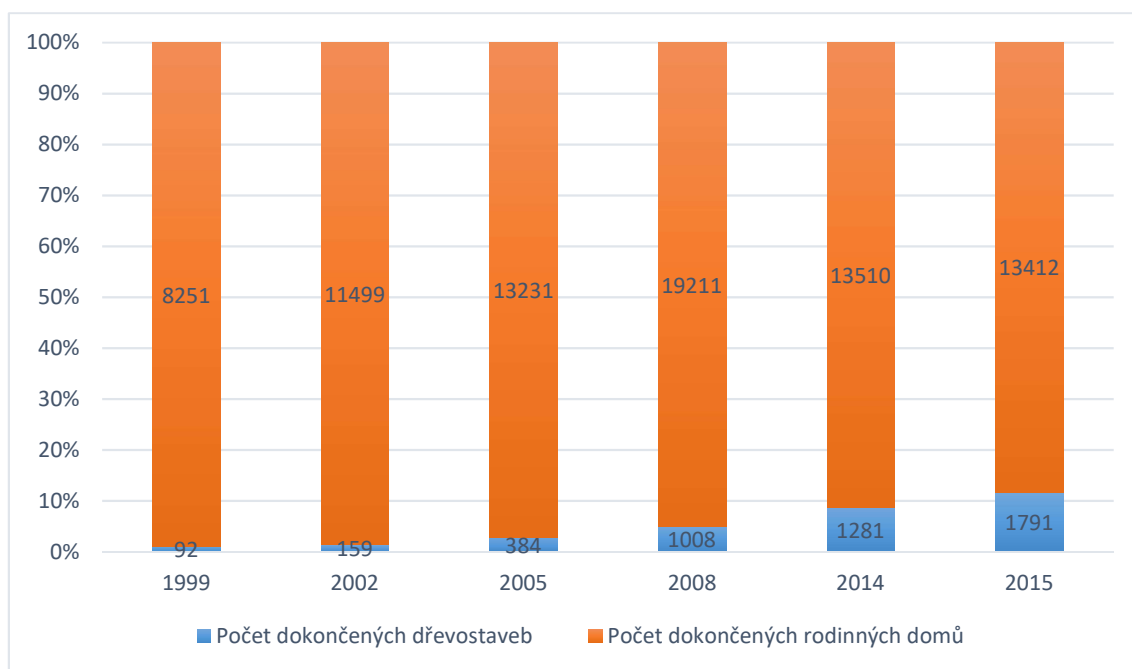
2 Dřevostavby ve střední Evropě

Stavění ze dřeva má dlouholetou tradici. Kromě kamene není snad jiného materiálu než dřeva, který je člověkem tak dlouhou dobu používán ve stavebnictví. Jelikož se v dřívějších dobách stavělo výhradně z materiálů lokálně dostupných, transport materiálu na delší vzdálenosti nepřípadal v úvahu, to mělo za následek, např. že ve skalnatých oblastech byl prioritní materiál kámen naopak v planinách hlína a například v tropických oblastech zase dřevo. Obliba ve stavění ze dřeva v místech, kde bylo kvalitního dřeva dostatek, se udržela do první poloviny 18. století. [1] [2]

Velký zlom ve stavění dřevěných domů nastal vlivem úředních nařízení, kdy se tento druh výstavby začal zakazovat. Jeden z prvních zákonů zakazujících použití dřeva k výstavbě byl „C.k patent pro hašení ohně“, od roku 1755. Ten výhradně zakazoval stavět dřevěné domy ve městech. Dalším ustanovením zpřísnující stavět domy ze dřeva byl „Požární řád Josefa II“ z roku 1785. [2]

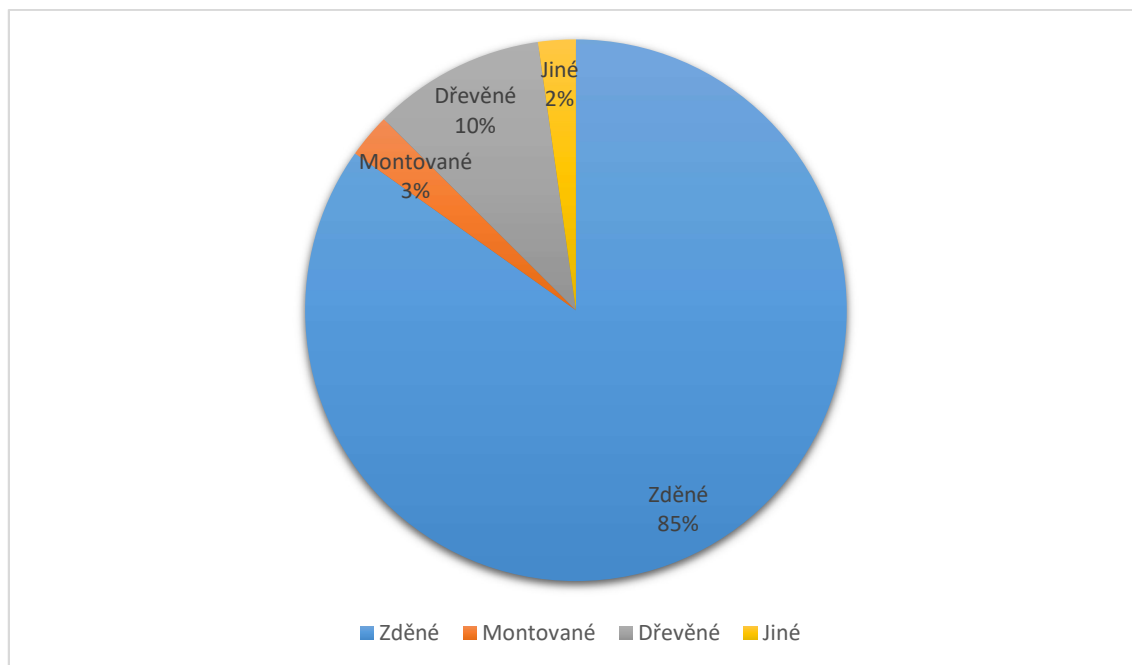
Dalším zlomovým okamžikem pro výstavbu dřevěných domů byla industrializace, která v 19. století výrazně ovlivnila stavění a využívání materiálů. Mimo tento vývoj, který byl zejména podporován výzkumem, se hojně rozmohla přeprava materiálů na delší vzdálenosti, a to hlavně díky cenové výhodnosti. [2] Pozitivně pohlížející k dřevostavbám byl stavební řád z roku 1833, který za určitých podmínek povoloval dřevěné stavby v horských oblastech. Všechny tyto kroky však vedly k tomu, že se na dřevostavby začalo pohlížet jako na domy nižší užitné hodnoty. Byly spojovány s něčím nekvalitním, neodolným, prostě materiál, který není vhodný ke stavbě domů. [2]

I přes všechny zmiňované náležitosti, které tradičnímu stavění ze dřeva moc nepřály, se na začátku 21. století opět dřevo stává oblíbenějším a oblíbenějším konstrukčním materiálem pro stavbu rodinných domů. Když se zaměříme na počet postavených dřevostaveb v roce 1999, kdy se postavilo téměř 100 dřevostaveb tak v roce 2015 už to bylo téměř 20krát tolik. Z toho vyplývá, že zájem o stavění ze dřeva pořád roste, a to i na úkor menšího celkového počtu dokončených rodinných domů. Počty dokončených rodinných domu a počet dřevostaveb od roku 1999-2015 jsou shrnuty v grafu 1. [3]



Graf 1 Statistika počtu dokončených rodinných domů [3]

Do roku 2014 Český statistický úřad zpracovával informace od stavebních úřadů, které evidovali a zařazovali při kolaudaci staveb pouze dle čtyř kategorií.

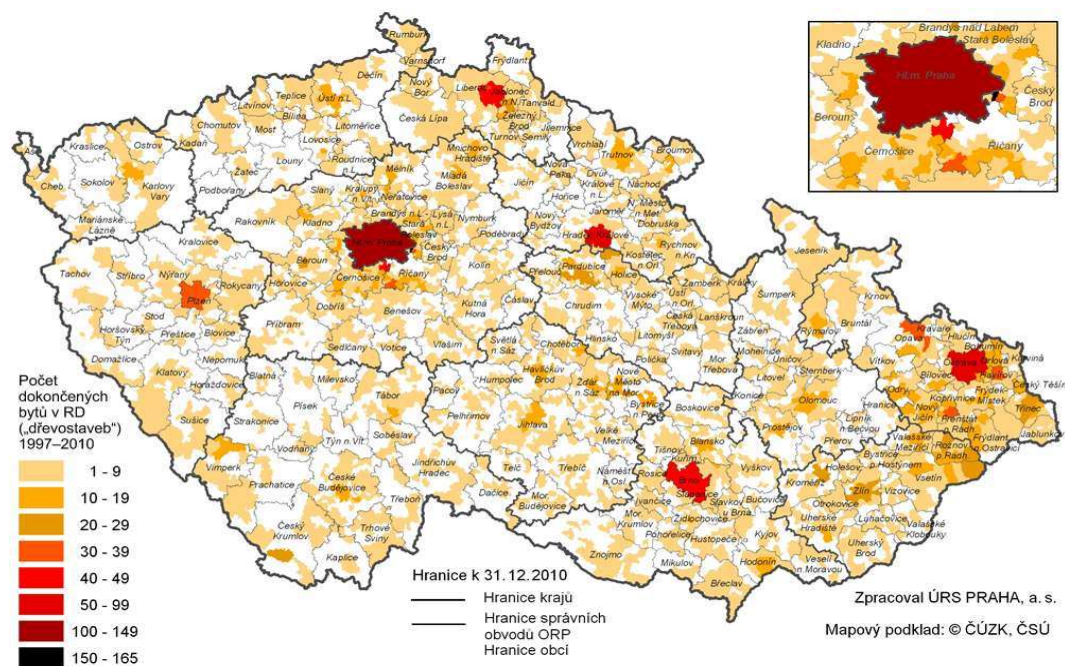


Graf 2 Průměrný počet postavených rodinných domů z hlediska výstavby od roku 2012-2015 [4]

Na žádost asociace dodavatelů montovaných domů (ADMD) od počátku roku 2015 bylo zavedeno Českým statistickým úřadem přesnější sledování nosných konstrukcí staveb, kde všechny stavby s dřevěnou konstrukcí se dále budou dělit na podskupiny, viz *Tabulka 1*.

Tabulka 1: Dokončené rodinné domy v ČR v roce 2015 dle nosné konstrukce [5]

Materiál nosné konstrukce	Počet rodinných domů
Cihly, tvárnice a cihlové bloky	11 212
Neurčeno	2 425
Cihly pálené (plné nebo dutinové)	5 191
Porobetonové tvárnice (bílé nebo šedé)	3 134
Liapor tvárnice (keramzit)	91
Cihly vápenopískové	114
Betonové tvárnice s izolací	126
Ostatní	131
Stěnové panely	326
Neurčeno	22
Beton (stěnové železobetonové panely)	229
Ostatní (s výjimkou dřeva)	75
Dřevo	1 791
Neurčeno	92
Sruby a roubenky	222
Lehký rámový skelet (panelová montáž)	623
Lehký rámový skelet (staveništní montáž)	537
Těžký skelet	52
Panely z masivního dřeva	92
Ostatní	173
Jiné materiály a kombinace	83
Neurčeno	18
Ocel	13
Ostatní	52
Celkem	13 412

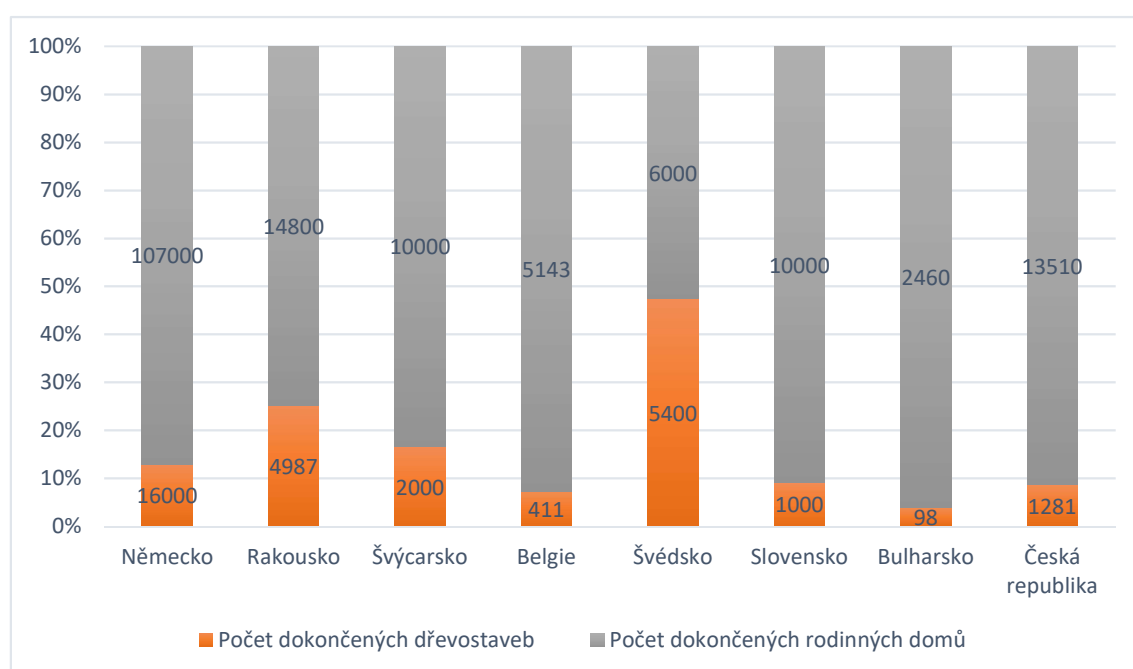


Ilustrace 1 Počet dokončených bytových a rodinných domů (dřevostavby) 1997-2010 [6]

V ostatních zemích na území Evropy a USA jsou na tom s podílem postavených dřevostaveb ještě o něco lépe, např. na území Rakouska je už třetina nových rodinných domů ze dřeva, největší podíl postavených dřevostaveb mají však skandinávské země jako například Švédsko, kde je tento podíl dokonce 90 %.

Čím dál větší zájem o tento druh konstrukčního materiálu může mít své opodstatnění z mnoha důvodů:

- větší informovanosti
- zájem o konstrukční materiál z přírodních obnovitelných zdrojů
- stavbu s výbornými tepelně izolačními vlastnostmi
- rychlost výstavby



Graf 3 Podíl dokončených dřevostaveb ve vybraných evropských zemích v roce 2014 [4]

3 DRUHY DŘEVOSTAVEB

Kapitola uvádí druhy dřevostaveb z hlediska konstrukčního systému jako celku, kde budou uvedeny vždy výhody a nevýhody jednotlivých konstrukčních systémů. Dále budou porovnány jednotlivé systémy v závislosti na čase, z pohledu zdokonalení technologií ve výrobě, respektive výstavbě dřevostaveb.

3.1 Masivní stavby ze dřeva

Jedná se především o stavby srubové a roubené. Společným znakem pro obě tyto stavby je jednovrstvá konstrukce složená z vodorovných dřevěných prvků. Buď nehraněných trámů, tzv. kuláčů zbavených kůry, spoj v rozích jednoduchý sedlový s přesahy. V tomto případě hovoříme o stavbách srubových. Roubené stavby, které mají v české republice daleko větší tradici, jsou sestaveny z hraněných trámů. Spojení prvků v rozích je na tzv. rybinu. Díky zkosení bylo zamezeno vybočení jednotlivých prvků z vazby. Vodorovné spáry se vyplňovaly mechem a omazával hlínou. Tento způsob v dnešní době nahradila vyfrézovaná drážka s vložením přírodní tepelné izolace. [2]

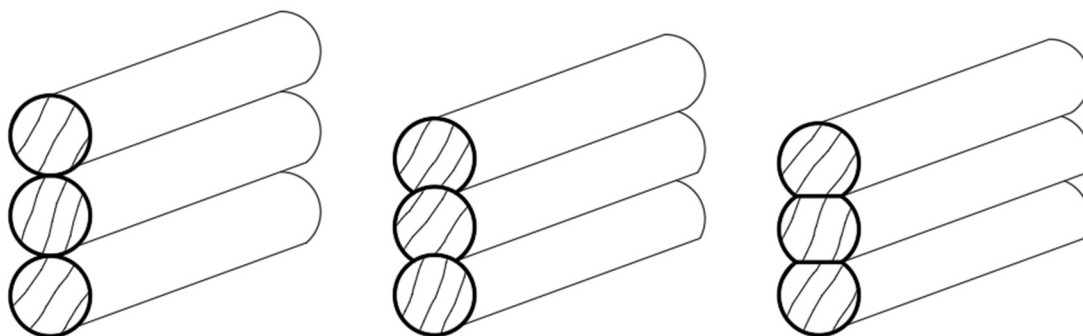


Schéma 1 Jednoduchý sedlový spoj s přesahem [2]

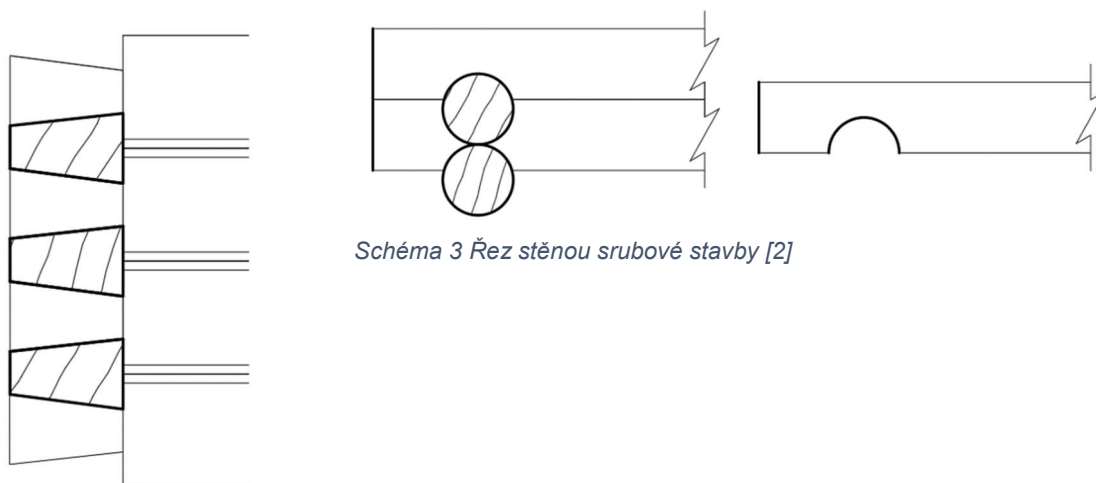


Schéma 3 Řez stěnou srubové stavby [2]

Schéma 2 Spoje v rozích tzv. na rybinu [2]

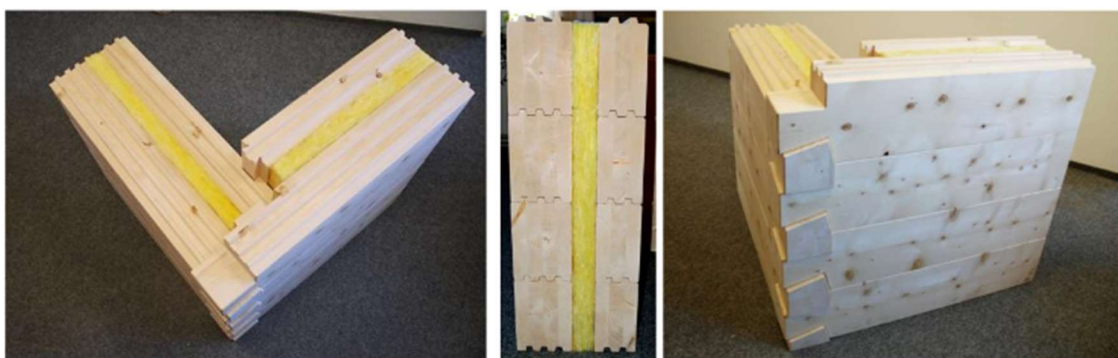
Vzhledem k rostoucím tepelně technickým požadavkům obvodových stěn, kdy by obvodová konstrukce měla splňovat hodnoty součinitele prostupu tepla téměř pasivních standardů, tj. $U_{pas}=0,18-0,12 \text{ W/m}^2\text{K}$, jsou nemožné tyto požadavky splnit pouhou masivní konstrukcí ze dřeva, která by měla více než

jeden metr. Proto se začali realizovat konstrukce vícevrstvé s vloženou tepelnou izolací. [7]

Tyto systémy jsou však zajímavé tím, že příznivě ovlivňují mikroklima v interiéru. A to nejen kvůli svému přírodnímu vzhledu ale také kvůli své fyzikální vlastnosti v určité míře regulovat vlhkost v prostředí. Povrch dřeva může být v interiéru přiznán, nebo stěna může být přizpůsobena k obležení např. sádkartonovými deskami. Systém není tak náročný na potřebu kvalitního dřeva jako srubové stavby. Podobně na tom je i z hlediska objemových změn, které vrstvená roubená stěna vykazuje. [7]

Typickým příkladem je moderní roubenka od firmy OK PYRUS. Konstrukce roubené stěny je zhotovena z masivních lepených profilů s vloženou tepelnou izolací. Použité lepidlo je ekologicky nezávadné na bázi melaminových pryskyřic, které jsou pro člověka také zcela zdravotně nezávadné. Tento způsob výroby, neztrácí důležitou schopnost dřevěné stěny dýchat stejně jako je tomu u nelepeného přirozeně rostlého dřeva. [8]

Technologie stavby spočívá v dokonalém provedení jednotlivých tesařských detailů a spojů na počítačem řízeném dřevoobráběcím centru (CNC), kdy se stavba vyrobí jako stavebnice ve výrobní hale a následně transportuje a smontuje přímo na stavbě. Touto technologií odpadají problémy se sedáním stavby vlivem sesychání a další problémy s přírodním chováním nevysušeného masivu. Srubová stěna vyráběná ze surové kulatiny si během prvních pěti let sedne a seschne o 4–6 cm na jeden metr výšky stěny. [8]



Ilustrace 2 Masivní dvoustěny s vloženou izolací [8]

Podélná spára jednotlivých dílů je izolována dvěma paměťovými PU páskami a vzhledem k rostoucím tepelně technickým požadavkům vložena tepelná izolace z kamenné vlny. Takováto konstrukce poté, bez problému, splňuje kritéria zařazení mezi nízkoenergetické domy. [8]

Ilustrativní tepelně technické parametry a vyhodnocení konstrukce roubené stěny OK PYRUS [9]:

Okrajové podmínky:

- Návrhová venkovní teplota: $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Návrhová teplota vnitřního vzduchu: $20,6\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Návrhová relativní vlhkost venkovního vzduchu: 84,0 %
- Návrhová relativní vlhkost vnitřního vzduchu: 55,0 %

Tabulka 2: ROUBENÁ STĚNA OK PYRUS, skladba od interiéru [9]

Číslo	Název	d [m]	λ [W/mK]
1	Dřevo měkké	0,12	0,13
2	Minerální izolace (Isover UNI)	0,06	0,035
3	Dřevo měkké	0,16	0,13

Výsledky posouzení:

- Součinitel prostupu tepla konstrukce $U=0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$
- Množství zkondenzované vodní páry $M_{c,a}= 0,037 \text{ kg/m}^2, \text{rok}$
- Množství vypařitelné vodní páry $M_{ev,a}=0,163 \text{ kg/m}^2, \text{rok}$

3.2 Konstrukční systémy na bázi dřeva

Jedná se o konstrukční systémy v současnosti v České republice, respektive v Evropě nejvíce používané v oblasti dřevostaveb. Tuto skupinu můžeme déle rozdělit na stavby:

- a) z lehkého (rámy z fošen) skeletu
- b) z těžkého (z trámů) skeletu
- c) ze sendvičových či masivních panelů

Dnešní skeletové systémy vznikly z podstaty staveb tzv. hrázděných, kde ztužení bylo prováděno pomocí šikmých vzpěr. Zjednodušení spočívalo ve vynechání již zmiňované šikmé vzpěry. Ztužení nahrazovalo vnější opláštění původně z vodorovně či šikmo přibitých prken, dnes nahrazeno velkoformátovými deskovými materiály na bázi dřeva.

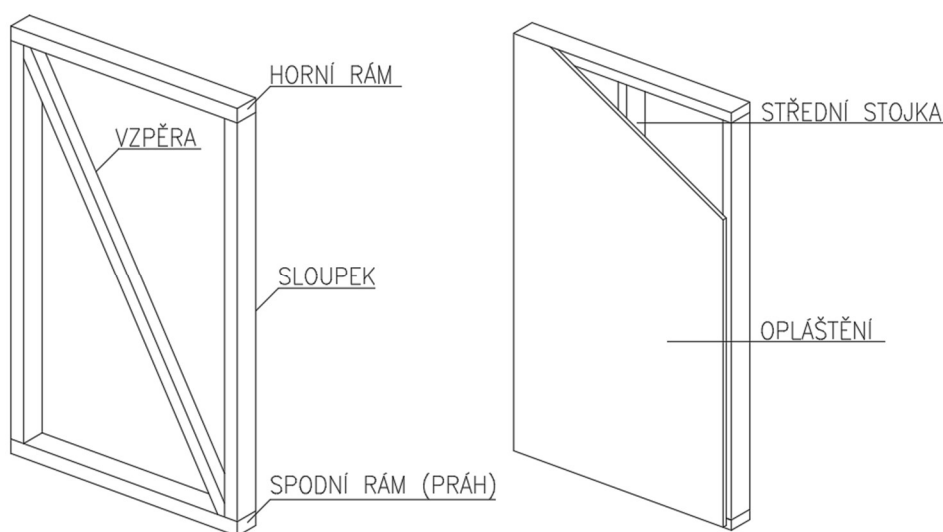


Schéma 1 Ztužení stěny hrázděné pomocí vzpěry a výztužné opláštění u stavby elementární

Mezi nejrozšířenější skeletový systém staveb stavěných přímo na stavbě z lehkého rámu je systém Two by four (dva x čtyři). Two by four proto, protože

nejpoužívanějším konstrukčním prvkem v konstrukci je fošna o rozměrech 2/4 palce což je cca 50/100 mm. V dnešní době spíše 60/180 z důvodu zvýšených požadavků na tepelnou izolaci obvodových stěn. Jednotlivé spoje jsou pouze natupo a spojovány převážně pomocí hřebíků. [2]

Svislé sloupky mohou být provedeny jako průběžné na celou výšku stavby „Balloon-Frame“ nebo jsou v úrovni stropu ukončeny tzv. „Platform-Frame“.

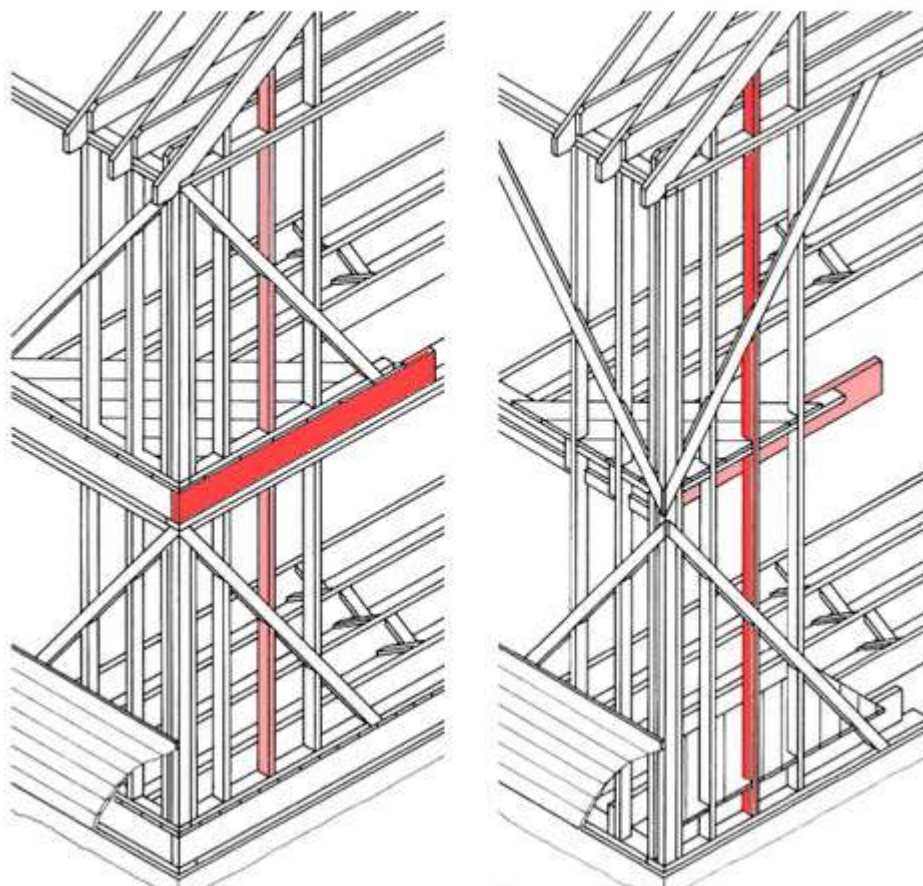


Schéma 2 Nosná konstrukce stavby: a) Balloon Frame, b) Platform-Frame [2]

Stejný konstrukční systém může být prováděn i s částečnou prefabrikací, to znamená, že stavba je rozdělena na jednotlivé rámy, které se ve výrobní hale vyrobí ale pouze s částečným jednostranným opláštěním. Tento postup zkracuje dobu výstavby a vystavuje dřevo menší dobu, kdy musí odolávat povětrnostním vlivům. [2]

Pokud bychom zvolili cestu úplné prefabrikace, hovořili bychom o tzv. panelových dřevostavbách. Kdy se jednotlivé panely zhotoví kompletně celé včetně rozvodu instalaci přímo ve výrobní hale. Hotové panely se transportují na připravené staveniště, kde se osadí na základovou desku. [2]

4 Tepelně vlhkostní zátěž konstrukcí obecně

Následující část popisuje šíření tepla a vlhkosti v konstrukci. Budou uvedeny vlivy, které tyto jevy ovlivňují. Dále budou uvedeny požadavky a pohled na danou problematiku ve vztahu k českým technickým normám.

4.1 Šíření tepla

V tepelně technických výpočtech, českých technických norem, v oblasti šíření vlhkosti a tepla se pohlíží jako na stacionární stav, tj. stav ustálený. Pokud hodnotíme šíření tepla, lepe řečeno, způsob přenosu tepla jako stacionární stav zavedíme do výpočtu pouze jednu tepelnou charakteristiku a tou je tepelná vodivost λ [W/m. K]. [10]

Pak z 1. Fourierova zákona vyplývá, že vektor hustoty tepelného toku je úměrný gradientu teploty a má opačný směr.

$$\vec{q} = -\lambda \cdot \vec{\nabla} \cdot \Theta(x, y, z) \quad (1)$$

$$q = \lambda \frac{\partial \Theta}{\partial x} = konst.$$

$$q = \lambda \frac{\Delta \Theta(x)}{\Delta x} = \frac{\Delta \Theta(x)}{\frac{\Delta x}{\lambda}}$$

$$\frac{\Delta x}{\lambda} = R$$

kde q – hustota tepelného toku [W/m²]

λ – tepelná vodivost [W/m.K]

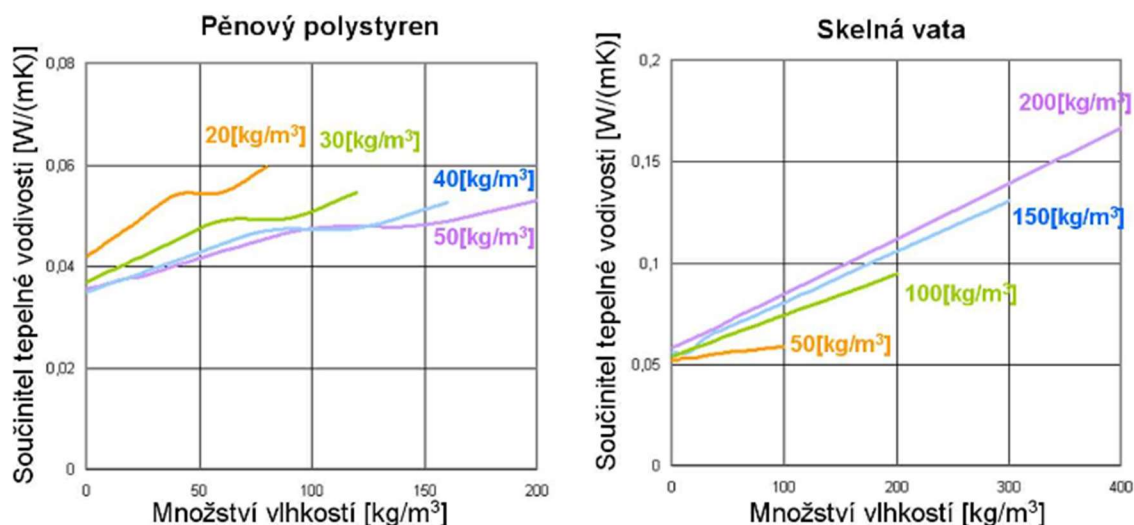
θ – teplota [K]

R – tepelný odpor konstrukce [m²K/W]

Pokud vedení tepla charakterizujeme pouze takto tj. pomocí jedné veličiny, a to tepelné vodivosti, je tento fyzikální jev správný pouze za konstantních okrajových podmínek, tj. konstantní vnitřní a vnější teploty vzduchu nemění se v čase. Ve skutečnosti je ale konstrukce zatížena proměnlivými okrajovými podmínkami v závislosti na čase. Další veličinou, která vedení tepla ovlivňuje, je množství naakumulovaného tepla, které zase souvisí s jinými vlastnostmi použitých materiálů a sluneční záření na povrchu konstrukce.

Největším nepřítelem ovlivňující tepelně technické vlastnosti materiálu může být i vlhkost. Ve skutečné konstrukci se v konstrukci vyskytuje určité množství vlhkosti, které má nezanedbatelný vliv na šíření tepla konstrukci.

Hodnota součinitele tepelné vodivosti ti výrazně roste se vzrůstajícím množstvím vlhkosti daného materiálu, a to zejména materiály které plní přímo funkci tepelné izolace v konstrukci. [10]



Ilustrace 3 Závislost tepelné vodivosti λ [W/mK] dvou izolačních materiálů na množství vlhkosti v materiálu v [kg/m³] pro různé objemové hmotnosti izolačních materiálů. [10]

4.2 Šíření vlhkosti

Podobným způsobem jako konstrukcí prostupuje tepelný tok, prostupuje konstrukcí také vodní pára. Tuto problematiku popisují Fickovi fyzikální zákony difúze.

Pokud mezi dvě prostředí o různém parciálním tlaku vodních par (interiér/exteriér) vloží póravitou látku (obvodovou stěnu), dochází k difúzi vodních par. Materiály, které brání difúzi vodní páry musí mít mezimolekulární prostory menší než střední volná dráha molekul plynu. Pro vodní páru je střední volná dráha molekul $2,78 \cdot 10^{-10}$. [11]

První Fickův zákon difúze říká že, hustota difúzního toku j [mol/m²s] je úměrná gradientu koncentrace $c=n/V$ [mol/m³] difundujících částic molekul vodní páry (na obrázku označených písmenem A). Kde n je počet molů částic (molekul) v objemu V substrátu (stavebního materiálu na obr. označen symbolem B) [12]

$$j = -D_{AB} \cdot \nabla c_{AB} = -D_{AB} \text{grad}(c_A) \quad (2)$$

kde D_{AB} —difúzní koeficient pro plyn A v materiálu B (hodnoty lze nalézt ve fyzikálních tabulkách) [m²/s]

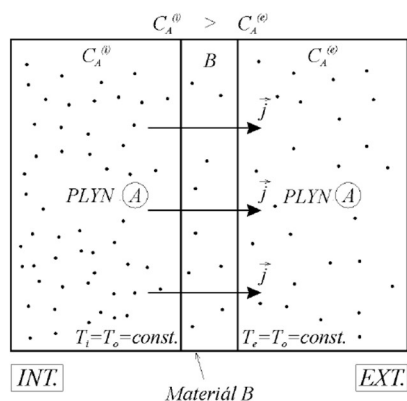


Schéma 3 Difúze materiálovou vrstvou [12]

Místo koncentrací lze také obyčejně díky stavové rovnici difúzi uvádět pomocí parciálních tlaků: [12]

$$g_A = -\delta \cdot \text{grad}(p_a) \quad (3)$$

kde g_a —plošná hustota difúzního toku [$\text{kg/m}^2\text{s}$]

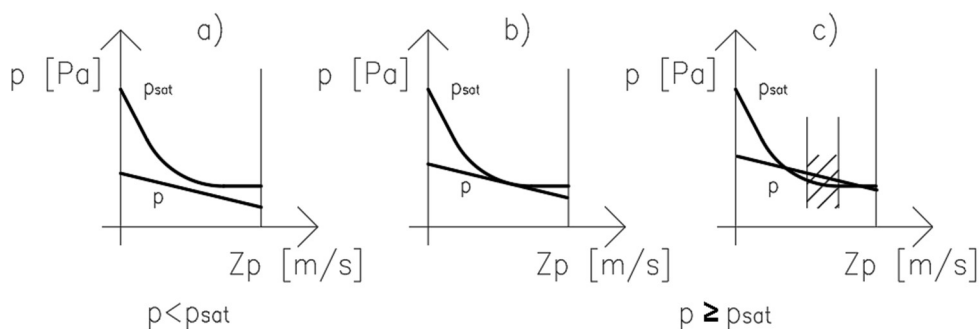
p_a —parciální tlak plynu A [Pa]

δ_A —součinitel difúzní vodivosti [kg/m.s.Pa]

Difundující páry se pohybují z míst vyššího tlaku směrem k nižšímu a za určitých podmínek mohou v konstrukci kondenzovat. V zimním období, kdy je rozdíl teplot a relativních vlhkostí na obou stranách konstrukce největší, dochází k difúzi vodní páry směrem ven. [11]

Metoda, dle které se hodnotí šíření vlhkosti v konstrukci a zároveň metoda o kterou se opírají postupy v českých normách je tzv. Glaserova metoda. Je to grafická metoda vyvinuta panem Glaserem v roce 1958. [10]

Zmíněný model vychází z porovnání teoretického průběhu částečných tlaků vodní páry p a průběhu částečných tlaků nasycené vodní páry p_{sat} . Jsou-li křivky $p \geq p_{sat}$, pak v konstrukci dochází ke kondenzaci vodních. Kondenzační zóna se pak najde pomocí tečen z koncových bodů přímky p ke křivce p_{sat} . [11]



Ilustrace 4 Průběh částečných tlaků vodní páry konstrukcí: a) v konstrukci nedochází ke kondenzaci, b) dochází ke kondenzaci v ploše, c) dochází ke kondenzaci mezi rovinami [11]

Metoda opět závisí pouze na jedné materiálové charakteristice a to na tzv. faktoru difúzního odporu μ [-]. Popisuje šíření vlhkosti konstrukcí pouze jako šíření vodní páry konstrukcí.

Pokud bychom se zaměřili na fyzikální správnost této metody zjistíme že, je fyzikálně správné pouze tehdy, pokud se v konstrukci uvažuje šíření vlhkosti pouze jako šíření vodní páry konstrukcí a pokud na obou stranách konstrukce uvažujeme konstantní okrajové podmínky, tj. konstantní vnitřní a vnější parciální tlaky vodních par. [10]

Metoda tedy vůbec neřeší šíření kapalně vlhkosti z místa kondenzace, sorpční kapacitu materiálů a proměnnost materiálových vlastností s obsahem vlhkosti, ani další formy působící vlhkosti, jako třeba zemní vlhkost, atmosférické srážky a proudění vlhkosti netěsnostmi spolu s pohybem vlhkého vzduchu trhlinami nebo uvnitř vzduchových dutin. [13]

Požadavky [14]

Požadavky uvádí norma ČSN 73 0540-2 v článku 6. Co se týče požadavků zkondenzované vodní páry uvnitř konstrukce jsou dány tyto požadavky:

- U konstrukcí, které by zkondenzovaná vodní pára uvnitř konstrukce mohla ohrozit její požadovanou funkci nesmí ke kondenzaci vodní páry vůbec dojít tedy:

$$G_{k,N} = 0$$

- $G_{k,N}$ je požadovaná hodnota celoročního množství zkondenzované vodní páry uvnitř konstrukce v $[\text{kg}/\text{m}^2\text{a}]$
- Za ohrožení funkce se obvykle považuje podstatné zkrácení životnosti konstrukce
- Co se týče dřevěných konstrukcí musí být respektovány zejména podmínky uplatnění dřeva anebo materiálu na bázi dřeva ve stavebních konstrukcích podle 5.1 a 5.4 v ČSN 73 2810 [34]
- V případě že kondenzace neohrozí požadovanou funkci konstrukce se omezení celoročního množství zkondenzované vodní páry uvnitř konstrukce omezuje splněním podmínky:

$$G_k \leq G_{k,N}$$

- Pro jednoplášťovou střechu, konstrukci s vnějším kontaktním zateplovacím systémem, vnějším obkladem, popřípadě jinou obvodovou konstrukci s difúzně málo propustnými vnějšími povrchovými vrstvami, je:

$$G_{k,N} = 0,10 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a}),$$

pro ostatní stavební konstrukce je:

$$G_{k,N} = 0,50 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$$

Pro tyto konstrukce musí zároveň platit požadavek 6.2 **Roční bilance kondenzace a vypařování vodní páry uvnitř konstrukce**. Tento požadavek pojednává o tom, že v roční bilanci kondenzace a vypařování vodní páry nesmí zůstat žádné množství zkondenzované vodní páry, které by trvale zvyšovalo vlhkost konstrukce. Tedy množství vypařitelné vodní páry musí být vyšší než množství zkondenzované vodní páry. [14]

Při zabudování dřeva anebo materiálů na bázi dřeva do stavebních konstrukcí, mimo respektování již zmiňovaných podmínek uplatnění dřeva anebo materiálu na bázi dřeva ve stavebních konstrukcích podle 5.1 a 5.4 v ČSN 73 2810 existují další podmínky které norma ČSN 73 0540-2 v článku 6 uvádí:

- Nutné dodržení dovolené vlhkosti dřeva dle ČSN 49 1531-1.
- Je-li ve stavebních konstrukcích hodnocených podle 6.2 dřevo a/nebo materiály na bázi dřeva, pak musí být provedena ochrana těchto materiálů podle ČSN 49 0600-1 nejméně pro třídu ohrožení 2 podle ČSN EN 335-1 a ČSN EN 335-2. Zároveň je při zabudování nutné dodržet jeho dovolenou vlhkost podle ČSN 49 1531-1.

5 Tepelně-vlhkostní mikroklima budov

Základní požadavek na vnitřní prostředí ať už pracovní či obytné je kvalita vnitřního mikroklimatu, definovaná jako teplená, akustická, světelná pohoda.

Tento požadavek musí být splněn za podmínky nejmenší spotřeby energie, a to jak ve fázi výstavby, kdy se sleduje množství energie spotřebované na výrobu materiálu, z kterého je objekt postaven, tak i ve fázi užívání kdy sledujeme množství energie potřebné na zajištění kvalitního vnitřního mikroklimatu.

5.1 Agencie ovlivňující vnitřní prostředí budov

Vnější prostředí

- Vnější klimatické podmínky

Vnitřní prostředí

- Člověk (pohlaví, věk, výška, fyzická aktivita)
- Vnitřní zařízení (spotřebiče)

Vnější zdroje agencii

Klimatické podmínky a čistota venkovního vzduchu, které závisí na

- Zeměpisné poloze
- Nadmořské výšce
- Charakteru krajiny

Tabulka 3 Územní teploty v roce 2015 [15]

Kraj	Měsíc												Rok
	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.	12.	
Česká republika	0,9	-0,1	4,0	7,8	12,4	16,1	20,2	21,3	13,1	7,9	5,8	3,7	9,4
Praha a středočeský	1,9	0,5	4,8	8,4	13,2	16,5	20,8	22,1	13,7	8,4	6,6	4,9	10,1
Jihočeský	0,8	-0,8	3,5	7,4	12,1	15,8	20,2	20,6	12,3	7,5	5,7	3,8	9,1
Plzeňský	1,0	-0,9	3,8	7,5	12,2	15,6	20,2	21,0	12,3	7,4	5,8	4,4	9,2
Karlovarský	-0,1	-1,7	3,0	6,2	11,1	14,3	18,2	19,4	10,7	6,4	5,1	3,7	8,1
Ústecký	1,5	0,0	4,4	8,0	12,6	15,5	19,7	21,1	12,7	7,8	6,3	4,6	9,5
Liberecký	0,7	-0,4	3,7	6,8	11,6	14,8	18,7	20,7	12,3	7,6	5,6	3,7	8,8
Královehradecký	0,8	0,2	4,1	7,7	12,3	15,8	19,8	21,6	13,4	8,1	5,3	3,5	9,4
Pardubický	0,9	0,1	4,0	7,8	12,3	16,1	20,3	21,6	13,3	8,0	5,6	3,6	9,5
Vysočina	0,5	-0,4	3,5	7,4	12,0	16,1	20,3	21,1	12,7	7,6	5,3	3,1	9,1
Jihomoravský	1,4	1,0	4,9	9,3	13,8	18,1	22,0	22,6	14,9	8,8	6,1	2,7	10,5
Olomoucký	0,3	0,0	3,8	7,9	12,2	16,1	20,1	21,4	13,7	7,8	5,1	2,5	9,3
Zlínský	0,6	0,2	4,1	8,1	12,8	17,0	20,7	21,5	14,1	8,4	5,4	2,6	9,6
Moravskoslezský	0,4	-0,2	3,7	7,6	11,9	15,9	19,9	20,9	13,6	7,6	5,7	3,3	9,2
Průměr	0,8	-0,2	3,9	7,7	12,3	16,0	20,1	21,2	13,1	7,8	5,7	3,6	9,3

Vliv na klimatické podmínky má nemalý vliv také, již zmiňovaný, charakter krajiny. Například zeleň, která ohraničuje daný prostor stavby, konkrétně listnaté stromy, v letním období fungují jako stínění, naopak v zimě zase umožňují pasivní solární zisky. Další funkcí může být funkce větrné a hlukové bariery či omezení denního vzestupu teploty (adiabatickým chlazením) a nočního sálání. Dalším pozitivním přínosem z hlediska tepelně vlhkostního mikroklimatu jsou vodní plochy. Ty zapříčiňují zmenšení kolísání teploty vzduchu (menší noční sálání půdy v důsledku vyšší vlhkosti). [16]

Vnitřní zdroje agencií

Zejména člověk, technické zařízení budovy (větrání, vytápění, klimatizace), se významně podílí na tvorbě vnitřního mikroklimatu jak kladným, tak záporným způsobem. V neposlední řadě je tomu i vybavení, které zajišťuje provoz budovy (např. osvětlení). [17]

Člověk na základě svých biologických pochodů produkuje teplo, které odevzdává do svého okolí. Nepřetržitým procesem je teplo transportováno z vnitřních tkání k povrchu kůže odkud se do prostředí sdílí: [17]



Ilustrace 5 Typy sdílení tepla člověkem do okolního prostředí [16]

- a) Sáláním
- b) Vedením
- c) Vypařováním

Energetický výdej [W/m^2] respektive tepelný výkon člověka je závislý na aktivitě, osobě (věk, postava, fyzická kondice) a v podmínkách ve kterých se nachází.

Rovnice tepelné rovnováhy: [17]

$$M - W = E_{res} + C_{res} + K + C + R + E + S \quad (4)$$

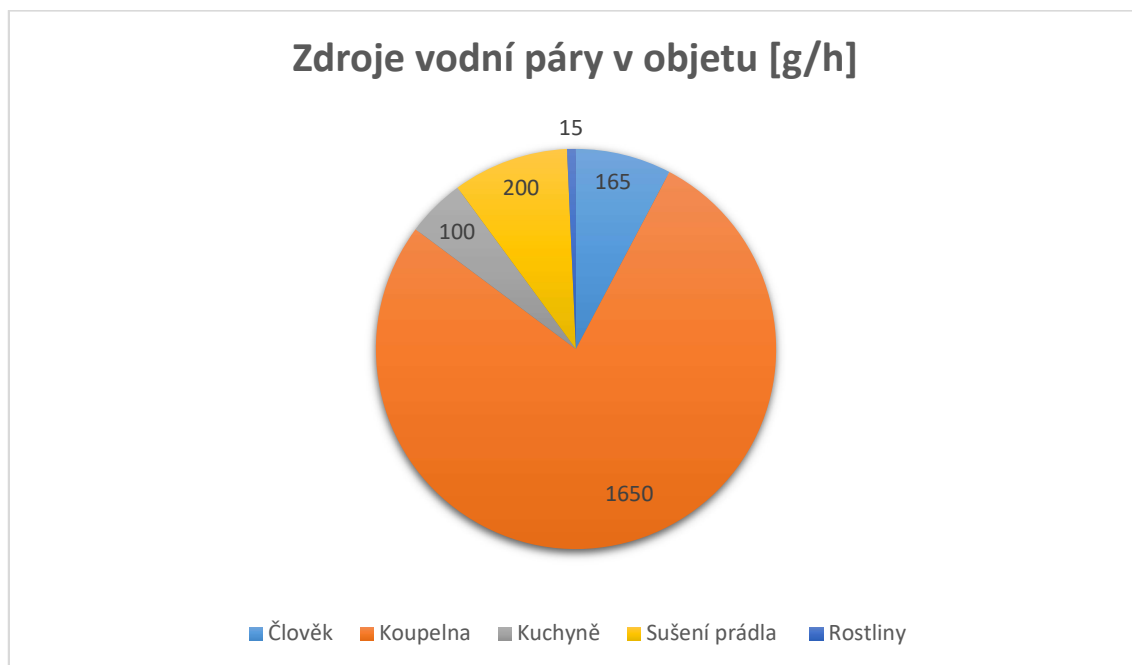
Tato rovnice vyjadřuje, že vnitřní produkce tepla v těle, která odpovídá energetickému výdeji M zmenšenému o mechanický výkon W , se vyrovná tepelnými výměnami v dýchacím ústrojí prouděním C_{rec} a odpařováním E_{rec} , a zejména tepelnými výměnami na kůži vedením K , prouděním C , sáláním R a odpařováním E a také konečnou bilancí akumulací tepla v těle S . Pokud se $S=0$ je člověk ve stavu tepelné rovnováhy.

Metabolická tepelná produkce se rozděluje do dvou skupin:

- a) Bazální metabolismus
 - Teplo produkované na základě biologických procesů v lidském těle
 - Muži 44 W/m², ženy 41 W/m²
- b) Svalový metabolismus
 - Energie uvolněná vlivem konání práce
 - Poloha těla:
 - V sedě 10 W/m²
 - V kleče 20 W/m²
 - Ve stoje
 - Druh a rychlost práce:
 - Práce rukou 30 W/m²
 - Práce oběma pažemi 85 W/m²
 - Práce trupem 190 W/m²

Běžné práce prováděné v interiéru budov mají hodnotu energetického výdeje 80-100 W/m² včetně hodnoty tepelné produkce bazálního metabolismu.

Člověk nevydává do prostředí jen teplo, člověk je také v interiéru budov zdrojem vodní páry. Výdej tepla difuzí vodní páry pokožkou a odpařováním potu je v rovnici tepelné rovnováhy člen E . Za optimálních podmínek se vyprodukovaná vodní pára rozptýlí v okolním vzduchu a pokožka zůstává suchá. V tom horším případě, kdy je v okolním prostředí vysoká teplota, se tělo začíná ochlazovat mokrým pocením. [18]



Graf 3 Zdroje vodní páry v objektu [18]

5.2 Optimální teplota a vlhkost vnitřního prostředí

Teplný pocit člověka závisí zejména na tepelné rovnováze jeho těla jako celku. Tuto rovnováhu ovlivňuje hned několik faktorů, a to tělesná činnost, oděv a parametry prostředí.

Parametry vnitřního prostředí:

- Teplota vzduchu
- Střední radiační teplota
- Teplota výsledná
- Rychlost proudění vzduchu
- Vlhkost vzduchu

Teplota

V hodnocení tepelně vlhkostního mikroklimatu budov se dost často, při splnění výše zmiňovaných parametrů vnitřního prostředí, používá termín tepelná pohoda.

Definice tepelné pohody je sousta:

- Tepelná pohoda je dosaženo v takových tepelných poměrech, kdy člověku není ani chladno ani teplo, člověk se cítí příjemně.
- Tepelná pohoda někdy také označováno jako tepelná neutralita se označuje stav, kdy prostředí odnímá člověku jeho tepelnou produkci bez výrazného (mokrého) pocení.

Měli bychom mít ale na paměti, že tepelná rovnováha nemusí být podmíněna tepelnou pohodou, ale v opačném pořadí to tvrdit nelze. Respektive tepelné rovnováhy můžu dosáhnout i v nepříjemně těžkém oděvu kdy o tepelné pohodě nemůže být ani řeč. [16]

Teplota vzduchu se měří klasickým teploměrem. V tomto případě, zanedbáváme vliv sálání okolních povrchů. Tato teplota může být v každém místě místnosti jiná, a proto nám při posuzování tepelné pohody jde spíše o rozdíl teplot v daných místech. Z toho vyplývá, že čím větší rozdíl teplot tím se v dané místnosti budeme cítit hůře. [16]

Pro člověka je důležitá, z hlediska splnění tepelné pohody, ještě tzv. radiační pohoda. Ta spočívá v tom, že člověk dostává teplo radiací, neboť je na to zvyklý z venkovního prostředí (sálání slunce), a své vyrobené teplo odevzdává do okolí konvekci, tj. ochlazením okolním vzduchem. To je taky důvod, proč nám posezení u rozpáleného krbu přijde tak příjemné. Tuto podmínku vyjadřuje tzv. součinitel radiační pohody (Radiant Comfort Coefficient – RCC) má být větší nebo alespoň roven 1. [18]

$$RCC = \frac{radiace}{konvekce} \geq 1 \quad (5)$$

Další hygienický požadavek pro interiér, přípustný rozdíl mezi teplotou vzduchu a teplotou stěn, lze stanovit z výše uvedeného vztahu. Teplota, která zahrnuje sálání okolních povrchů (střední radiační teplota) a zároveň i teplotu vzduchu je teplota výsledná, která se měří kulovým teploměrem. [17]

Kromě tepelné rovnováhy a splnění radiační pohody je lidský organismus citlivý na rovnoměrný odvod tepla do okolí, to jednak v prostoru a jednak v čase. V prostoru to znamená, že ochlazování nohou se nesmí příliš lišit od ochlazování hlavy (teplota ve výši nohou a hlavy by neměly být moc rozdílné), a rovněž proudění vzduchu by mělo být rovnoměrné, to znamená, že je třeba zabránit průvanu. Zabezpečit rovnoměrnost proudění v čase znamená nepřesáhnout přípustné kolísání teploty v průběhu dne na témže místě při přechodu v místnosti z jednoho místa na druhé bez změny oděvu. [18]

Tabulka 4 Další podmínky doplňující tepelnou rovnováhu [18]

Podmínka	Vliv vytápění a vzduchotechniky
Asymetrie radiační teploty od oken nebo jiných chladných svislých povrchů nesmí být větší než 10 °C Rozdíly teplot vzduchu mez úrovní hlavy a kotníků nesmí být větší jak 3 °C	Umístění vyústek přívodu vzduchu a otopných ploch
Asymetrie radiační teploty od teplého stropu nebo jiných vodorovných povrchů nesmí být větší jak 5 °C	Vytápěné nebo chlazené stropy či podlahy
Intenzita osálení hlavy od okna nebo infrazářiče nesmí být větší než 200 W/m ²	Umístění infrazářičů
Stupeň obtěžování průvanem ve středu vzdálenosti 50 cm od oken nebo jiných nadměrně ochlazovaných svislých stavební konstrukcí (dveře, okna) nesmí být větší jak 15 %	Umístění otopných těles a jejich dostatečná délka. Umístění a typ vyústek přívodu vzduchu.

Vlhkost vzduchu

Typy vlhkostí, které mohou ovlivnit výslednou vlhkost vzduchu:

- Stavební vlhkost (vlhkost vázaná v materiálu v důsledku mokřích technologických procesů)
- zemní vlhkost (v důsledku kapilární vztlakovosti)
- meteorologická vlhkost (déšť)
- zkondenzovaná vlhkost
- provozní vlhkost (zdroj např. člověk)

Vlhkost se může šířit jako

- difúze vodní páry
- voda
- vlhkost jako pevná látka (led).

Co se týče vnitřního prostředí staveb tak nás asi nejvíce bude zajímat termín relativní vlhkost vzduchu. Ta by se měla v pobytových místnostech pohybovat od 30 % (chladné období roku) do 65 % (teplé období roku).

Pokud hodnota bude menší jako 30 %, prostředí bude negativně ovlivňovat spíše člověka jak ohraničující konstrukce. Člověk bude trpět na vysychání sliznic, může dojít ke ztrátě obranyschopnosti a bude náchylnější k nemocem horních i dolních cest dýchacích. [18]

Vyšší relativní vlhkost bude negativně ovlivňovat i obalové konstrukce. Tady vzniká problém s rizikem růstu plísní a množení roztočů, což může u dětí vést opět ke zvýšenému výskytu dýchacích potíží, častým bolestem hlavy atd. Dospělí trpívají častěji nevolností, zvracením, dušností, bolesti v zádech atd. [18]

5.3 Způsob kontroly vnitřního prostředí

Teplota:

Pro posouzení tepelné pohody se nepoužívá klasická teplota ale teplota výsledná tj. tzv. teplota kulového teploměru, která zahrnuje jak teplotu vzduchu, tak teplotu obklopujících stěn. Měří se kulovým teploměrem.



Ilustrace 6 Kulový teploměr [32]

Rychlost proudění vzduchu:

Vyšší rychlosti proudění vzduchu jsou dalo by se říct příjemné při vyšších teplotách vzduchu, avšak pokud by byla rychlost příliš vysoká mohlo by to vést ke známám diskomfortu v těchto zónách a později i k zdravotním problémům. K měření slouží přístroje, které jsou schopny měřit malé rychlosti proudění (0,05-0,5 m/s). Používají se lopatkové anemometry, zde se využívá mechanických



Ilustrace 7 Anemometr s všesměrovou sondou [32]

účinků prodění vzduchu, anebo žárové anemometry, které měří rychlost proudění na základě ochlazování elektricky žhaveného elementu ty nejsou však tak přesné měří až od cca 0,2 m/s. Ideálním zařízením pro měření rychlosti prodění vzduchu je měření pomocí všesměrové sondy. Měření není závislé na směru prodění a měří již od 0,05 m/s.

Měření vlhkosti vzduchu:

Pro měření vlhkosti vzduchu, respektive relativní vlhkosti vzduchu, se nejčastěji používá kapacitních vlhkoměrů, kdy se na hodnotu vlhkosti převádí kolísání elektrické kapacity čidla. Relativní vlhkost se uvádí v procentech.



Ilustrace 8 Kapacitní vlhkoměr [32]

Měření koncentrace CO₂

K měření koncentrace CO₂ slouží opět mnoho přenosných zařízení. Existují dvě metody pro měření koncentrace CO₂, které pracují na principu absorpce infračerveného záření:

- nerozptylový infračervený (NDIR) snímač absorpce
- foto-akustický snímač



Ilustrace 9 Přístroj na měření CO₂ metodou NDIR

6 Optimalizace tepelně-vlhkostního mikroklimatu

Optimalizace tepelně vlhkostního mikroklimatu lze dosáhnout třemi základními způsoby:

- a) Zásah do zdroje
 - Z dlouhodobého hlediska nejúčinnější řešení
 - Objekt, který nejvíce ovlivňuje přenos energií na subjekt (člověka) obvodový plášť
- b) Zásah do prostředí
 - Instalace vhodného způsobu vytápění, respektive větrání, popřípadě klimatizace
- c) Zásah do subjektu
 - Uživatelsky nejjednodušší, respektive nejlevnější ale naopak nejméně komfortní
 - V případě tepelného mikroklimatu jej dosáhneme změnou používaného oděvu, tj. svléknutím nebo obléknutím dostatečnému počtu vrstev oděvu

7 Způsoby zajištění větrání budov

Problémům kvůli nedostatečnému větrání bytových staveb je spousta. Procento problém vzrostlo díky snižování energetické náročnosti budov, a to zejména silným zateplováním obvodových plášťů společně s výměnou otvorových výplní. Všechny zmiňované kroky, které vedou k energeticky úsporným objektům, ve většině případů následně úplně mění charakter vnitřního prostředí. Z ilustrací níže jsou patrné nejběžnější problémy vzniklé nedostatečným větráním.



Ilustrace 11 Orosování výplní otvorů z důvodu zvýšené relativní vlhkosti [19]



Ilustrace 10 Tvorba plísní na površích s nízkou povrchovou teplotou [20]

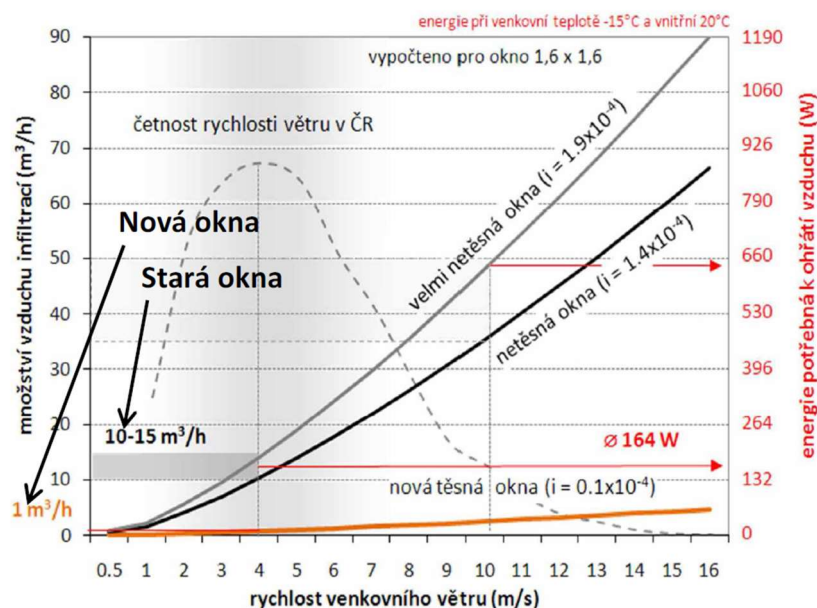
7.1 Bez nuceného větrání

Přirozené větrání, o kterém nemůže v dnešních energeticky úsporných objektech v podstatě ani řeč, funguje vlivem tlakového rozdílu vyvolaným: [21]

- a) rozdílnou teplotou
- b) dynamickým tlakem větru

K větrání docházelo netěsnostmi kolem oken, dveří, a i samotnými stavebními konstrukcemi (infiltrace). Jelikož záviselo výhradně na klimatických podmínkách, byl tento způsob dosti proměnlivý. Např. v létě za bezvětří a díky malému teplotnímu rozdílu byla infiltrace v podstatě nefunkční. Zase naopak v zimě byl ven vypouštěn teplý znehodnocený vzduch nahrazený sice čerstvým, ale studeným vzduchem. Díky tomu docházelo k velkým tepelným ztrátám.

Velikost infiltrace z pohledu kvality těsnosti oken je patrná z ilustrace 12.



Ilustrace 12 Množství vzduchu infiltrace v závislosti na těsnosti oken a energie potřebná k ohřátí infiltrovaného vzduchu [22]

Výpočet průtoku vzduchu přirozeným větráním

- rovnice proudění

$$V = C \cdot \Delta p^n \quad (6)$$

$$\Delta p = \frac{1}{2} \cdot A \cdot \rho \cdot w^2$$

$$\Delta p = h \cdot g(\rho_e - \rho_i)$$

kde V – průtok vzduchu [m³]

C – 0,33 (dle ČSN 73 0540)

n – 0,5-1,0 (běžně 0,67, dle tvaru otvoru)

Intenzita výměny n je pak poměr objemového průtoku vzduchu přiváděného do prostoru V k objemu téhož prostoru O .

$$n = V/O \quad (7)$$

Druhy přirozeného větrání

- Infiltrace (spáry oken, dveří, obalovými konstrukcemi), závisí zejména na orientaci místnosti ke směru převládajících větrů, intenzitě větru v dané lokalitě.

$$V = i \cdot l \cdot \Delta p^n \quad (8)$$

$$\Delta p = p_t + p_w = h \cdot g(\rho_e - \rho_i) + 0,5 \cdot A \cdot w^2 \cdot \rho_e$$

kde i – součinitel průvzdušnosti spáry [m³s⁻¹/m.Paⁿ]

Δp – rozdíl tlaku vyvolaný rozdílem teplot (t) a působením větru (w)

n – exponent charakterizující prodění vzduchu spárou (běžně 0,67)

l – délka spáry (celý obvod okna na závětrné straně) [m]

Pokud dispozice neumožňuje volné proudění vzduchu, vliv větru se zanedbává.

b) Aerace

Větrání je způsobeno dvěma otvory nad sebou. Zde se uplatňuje pouze rozdíl tlaků, kvůli rozdílné teplotě v interiéru a exteriéru.

Za předpokladu že plochy větracích otvorů jsou stejné a uvažujeme pouze vliv teploty, potom rovnice hmotnostního průtoku vzduchu má tvar:

$$m = S \cdot \mu \cdot \sqrt{2 \cdot \rho_e \cdot \rho_i \cdot \frac{h \cdot g(\rho_e - \rho_i)}{\rho_e + \rho_i}} \quad (9)$$

kde μ – výtokový součinitel pro přívaděcí/odváděcí otvor (0,6-0,7)

Tento způsob větrání je vhodný pro výrobní haly s vysokým vývinem tepla.

c) Provětrávání (okny)

Provádí se pouhým otevřením okna nebo dveří. V letním období mohou být okna otevřena trvale. V zimním období dochází k nadbytečnému úniku tepla a možné příčině onemocnění.

Způsob větrání	Doba jednonásobné výměny vzduchu
Zavřená okna (netěsnosti ve spárách)	3–10 h
Mikro ventilace	15–90 min
Polootevřená okna	6–12 min
Úplně otevřená okna	4–8 min
Úplně otevřená okna s průvanem	2–4 min

Tabulka 5 Účinnost větrání okny v závislosti na nastavení oken

Ilustrativní příklad provětrání místnosti oknem

Okrajové podmínky:

- objem místnosti 50 m³ (4x5x2,5)
- okno o rozměrech 0,8/1,4 m pootevřené odklon 15°
- $\theta_i = 21$ °C, $\theta_e = -3$ °C

Pomocí vztahu 5 zjistíme průtok vzduch větrání oknem.

$$V_p = \frac{2 \cdot \mu \cdot A}{3 \cdot \rho_i} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot g \cdot B \cdot \rho_e \cdot \rho_i \cdot (\rho_e \cdot \rho_i)}{(\sqrt[3]{\rho_i} + \sqrt[3]{\rho_e})^3}} \quad (10)$$

kde μ – výtokový součinitel kyvného okna

A, B – rozměry okna v [m]

ρ Hustoty vzduchu závislé na teplotě [kg/m^3]

Následně poměrem mezi průtokem vzduchu a objemem místností získáváme hodnotu $n=11,1$ /h. K jednonásobné výměně vzduchu tedy dochází za zhruba 5,4 minuty.

- d) Šachtové)
Provětrávání svislou šachtou.

7.2 Nucené větrání s využitím rekuperace tepla

Rekuperace neboli zpětné získávání tepla je proces, při kterém se teplo z odváděného vzduchu použije pro ohřev čerstvého přiváděného vzduchu. Pracuje v podstatě na principu přenosu tepla konvekci s nebo bez skupenských změn. Zařízení ZZT se dělí dle přenosu tepla na: [21]

- a) Rekuperační
b) Regenerační

Rekuperační zařízení ZZT

Přímá výměna tepla:

- Soustava tzv. „vzduch-vzduch“

- a) Deskový výměník

Systém tvoří soustava teplosměnných desek, mezi nimiž proudí střídavě studený a teplý vzduch. Jednotlivé proudy vzduchu jsou ve výměníku odděleny, proto nehrozí mísení kvality vzduchu. Účinnost obvykle okolo 50–80 %. Účinnost roste se zvětšující se teplosměnnou plochou. [21]

Jelikož zařízení pro ZZT není jistou část roku vhodné k provozování, z hlediska letních měsíců, kdy je teplota v exteriéru vyšší než požadovaná v interiéru, osazují se deskové výměníky s tzv. bypassem (ochozem) s uzavírací klapkou, který zajistí průchod vzduchu mimo výměník. [23]

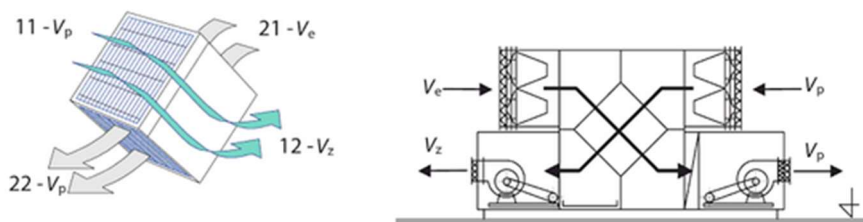


Schéma 4 Rekuperační systém s deskovým výměníkem s křížovým proudem [23]

Díky změně tvaru z čtvercových na šestiúhelníkové tvary deskových rekuperátorů, se proudění vzduchu změnilo z křížového průtoku, na proudy protiproudé viz schéma 7. Tímto řešením a přizpůsobením vnitřních kanálků tvarům, kde bude co největší turbulence vzduchu doprovázená co nejmenšími tlakovými ztrátami rekuperátoru se dosáhlo zvýšení účinnosti z původních 50–60% na současných 80–90%. Díky tak vysoké účinnosti a relativně nízké

ceně, jsou tyto rekuperátory běžně využívány ve větracích zařízeních rodinných a bytových domů nízkoenergetických a pasivních standardů. [24]

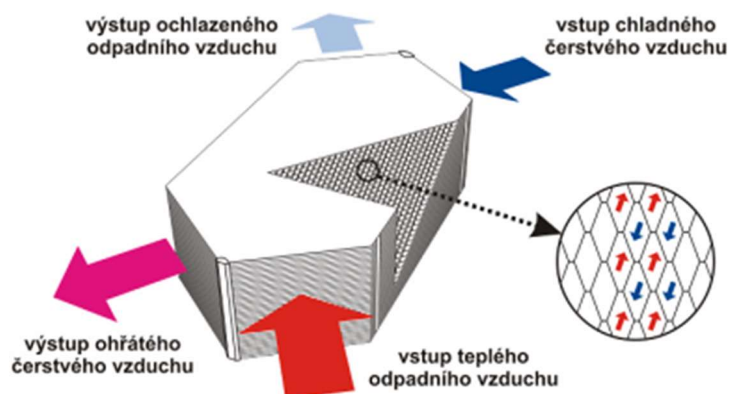


Schéma 5 Protiproudý rekuperační výměník z hlediska funkčnosti [24]

b) . Trubkový výměník

Fungují na stejném principu jako deskové výměníky s rozdílem teplosměnné plochy, kterou zde tvoří trubky. Nevýhodou oproti deskovým výměníkům je menší teplosměnná plocha a tím i menší účinnost. Tento druh výměníků se využívá především ve špinavých provozech, kdy slouží k odvodu silně znečištěného vzduchu či spalin. Výhodou je snadná údržba, proto našel využití právě zde. [25]

Pomocí teplosměnné látky:

a) Lamelové výměníky s kapalinovým okruhem

Zařízení je tvořeno dvěma lamelovými výměníky, které jsou propojeny kapalinovým okruhem. Přenos tepla v soustavě „vzduch-kapalina-vzduch“. Jeden výměník je osazen v potrubí vnějšího přiváděného vzduchu a druhý

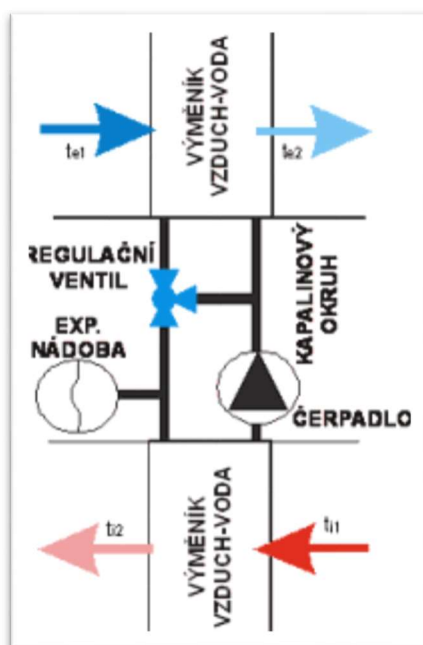


Schéma 6 Zařízení ZTT s lamelovými výměníky a kapalinovým okruhem [24]

v potrubí odváděného znehodnoceného vzduchu. Tento systém je vhodný zejména pokud se přívod a odvod vzduchu nachází v jiných místech (přívod v suterénu, odvod na střeše). V zimě ohřívá teplejší odváděný vzduch kapalinu a ta zase přívodní venkovní vzduch na přívodu z exteriéru. Výhodou je že systém dokáže využívat chlad v letním období ale pouze při malých teplotních rozdílech např. 31/26 °C. Systémy dosahují až 90 % účinnosti. [21]

Velice progresivní se stávají sestavy s lamelovými výměníky a multifunkčním využitím k účelům: [25]

- adiabatického chlazení sprchováním teplosměnné plochy vodou na straně odpadního vzduchu
- odvlhčování vzduchu
- ohřev vzduchu nízkou tepelnou energií

b) Tepelné trubice

Hlavním prvkem zařízení je trubice obsahující chladivo (freon, čpavek apod.), které umožňuje přenos tepla pomocí skupenských změn (vypařování a kondenzace). Tepelná trubice je naplněna chladivem, ve spodní části dochází k varu a odpařování chladiva. Teplo potřebné k odpaření se odebrává z proudu odváděného vzduchu. Páry chladiva stoupají vzhůru, kde kondenzují v proudu studeného čerstvého vzduchu, kterému předají kondenzační teplo a znovu

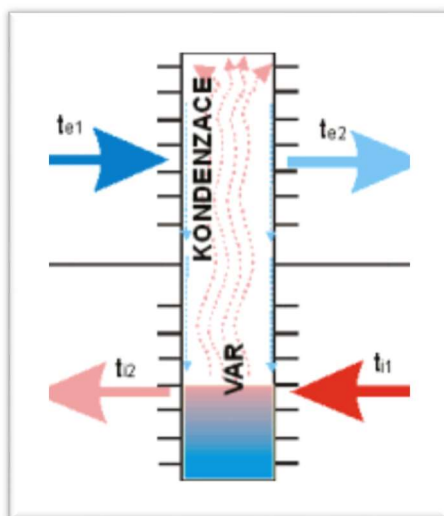
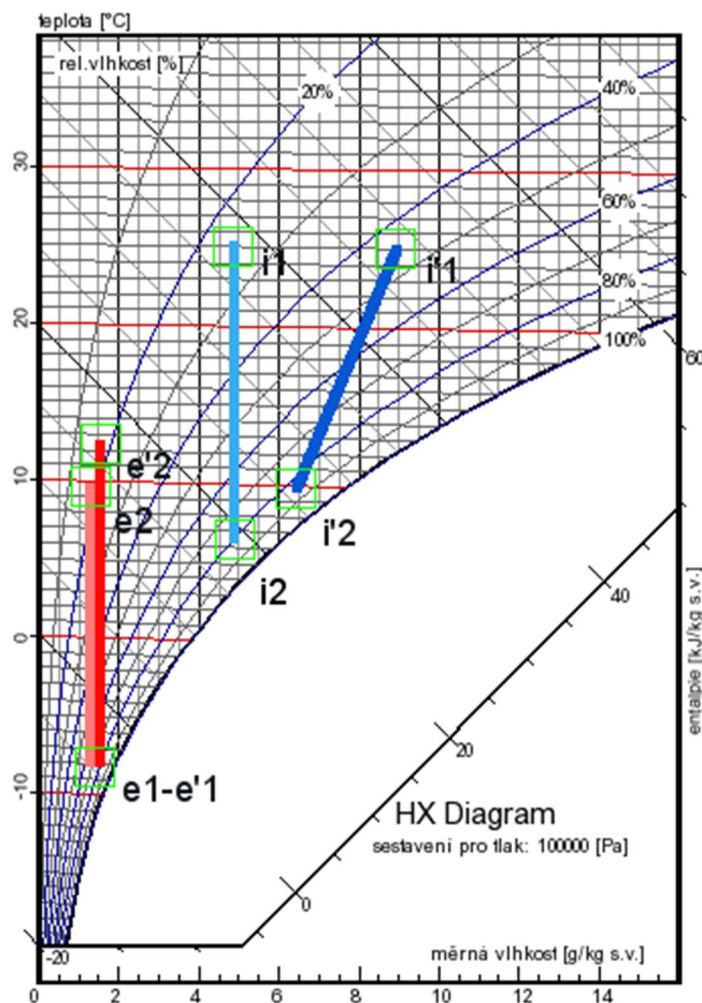


Schéma 7 Princip zařízení tepelné trubice [24]

stékají po stěnách zpět do spodní části. Použité chladivo a tlak v trubici musí odpovídat teplotám vzduchu. Jednotlivé trubice jsou vloženy do rámu a tvoří tak výměník, dle osazení, horizontální nebo vertikální. [20]

Z následující ilustrace je patrná typická změna stavu při rekuperaci tepla znázorněna v hx diagramu. Změny stavu vzduchu jsou zobrazeny jako úsečky mezi průměrným stavem vzduchu před a za rekuperátorem. Průměrné hodnoty proto, protože skutečný průběh závisí na dalších parametrech, např. teplosměnné plochy. [26]



Ilustrace 13 Typické průběhy změn vzduchu při rekuperaci [26]

Na diagramu je zobrazen průběh dvou řešení, které jsou shodná až na vlhkost odváděného vzduchu. V prvním případě, znázorněn bez indexové čárky, je vlhkost odváděného vzduchu malá, a protože průměrná teplota povrchu výměníku je vyšší než teplota rosného bodu odváděného vzduchu, tak ke kondenzaci nedochází. Ve druhém případě, znázorněné písmenem s indexem čárky, je vlhkost odváděného vzduchu vyšší a dochází ke kondenzaci. Při kondenzaci se zvýší předávaná energie, a proto teplota přiváděného vzduchu je vyšší než při procesu bez kondenzace. Účinnost se v tomto případě vlivem kondenzace zvýší asi o 6-7%. [26]

Regenerační zařízení ZZT

Základní prvek je regenerační výměník s možností přenosu tepla akumulační hmotou, která je periodicky ohřívána teplým a ochlazovaná chladným proudem vzduchu. Je-li, hmota z pórovitého materiálu přenáší se i vlhkost. Výměníky se dělí podle polohy akumulační hmoty a směru proudění vzduchu na:

a) Regenerační výměník rotační

Výměna tepla probíhá akumulací hmotou měnící svou polohu, směr proudění je stálý. Výměník tvoří rotor osazený do kovového rámu.

Přenos tepla i vlhkosti umožní akumulací hmoty rotoru při jeho otáčení z proudu teplého do proudu chladného vzduchu. Nevýhodou tohoto zařízení je, že se oba proudy vzduchu musí přivést do místa instalovaného výměníku. Tepelná účinnost je závislá na rychlosti otáčení rotoru a proudění obou proudů

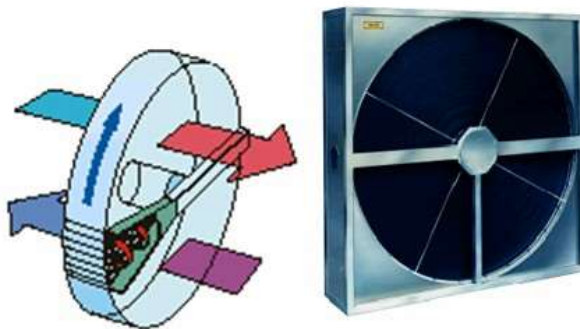


Schéma 8 Rotační výměník [24]

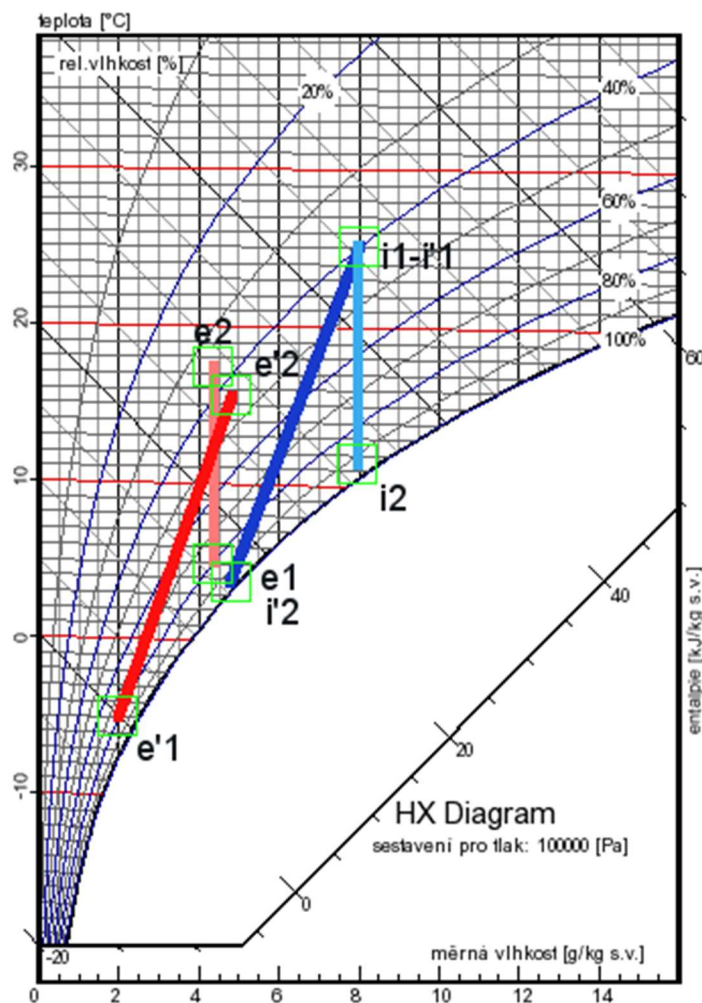
vzduchu. Účinnost ZZT závisí na materiálu výplně rotoru. Pohybuje se od 60–80 %. [24]

b) Regenerační přepínací výměník

Rozdílem proti rotačním výměníkům je, že akumulací hmoty nemění polohu, ale mění se protékající vzduch přes tuto hmotu. Prakticky se tyto typy realizují pomocí dvou akumulacích výměníků, přes které střídavě proudí čerstvý, v zimě studený a odpadní, v zimě teplý vzduch. Přepínání se děje na základě automatiky pomocí přepínacích klapek. Nevýhodou těchto zařízení je, že vždy část vzduchu, která může dosahovat 5–10 % celkového objemu, se dostává při přepínání z akumulací hmoty a klapkové sekce zpět. To znamená, že čerstvý venkovní vzduch se dostává zpět ven do venkovního prostředí a vnitřní odsávaný vzduch se dostává zpět do vnitřního prostoru. [24]

Rotační výměníky zpětného získávání tepla patří s ohledem ke své konstrukci a způsobu provozu mezi zařízení s největší účinností. Tepelná účinnost přepínacích výměníků je 60–90 %, vlhkostní účinnost může být 50–70 %. [27]

Průběh změny stavu vzduchu při regeneraci s použitím standardního zařízení bez úprav povrchu pro přenos vlhkosti je patrný z ilustrace 13. Opět jsou zobrazeny dvě řešení, která jsou stejná až na rozdíl ve stavu nasávaného venkovního vzduchu. V prvním případě, označeno bez indexové čárky, vlivem vyšších teplot nedochází ke kondenzaci, a proto se na obou stranách mění pouze teplota vzduchu, ale měrná vlhkost je stálá. Ve druhém případě, označeno indexem čárky, je povrchová teplota výměníku nižší, než teplota rosného bodu tudíž ke kondenzaci dochází. V ideálním případě se veškerá kondenzovaná voda předá do přiváděného vzduchu, kde opět dojde k jejímu odpaření. U některých výměníků dochází k odtoku kondenzátu a v tom případě se zvýší pouze termická účinnost, ale současně se nezvýší měrná vlhkost přiváděného vzduchu. [26]



Ilustrace 14 Typické průběhy změn vzduchu při regeneraci [26]

Závěr

Jelikož nedílnou součástí při výpočtu tepelných ztrát objektu je i ztráta větráním, proto každá dnešní novostavba, z hlediska snižování energetické náročnosti budov, musí obsahovat zařízení na snížení těchto ztrát. Použitím zařízení na zpětné získávání tepla, nejen že snížíme ztráty větráním, ale také zkvalitníme vnitřní mikroklima, které se v současných neprůvzdušných a vysoce tepelně izolačních objektech rapidně zhoršilo oproti vnitřnímu klimatu starších objektů. Zmiňovaná neprůvzdušnost objektů úzce souvisí, právě s účinností rekuperace. Ideální případ je patrný ze schématu 9. Zde je znázorněn případ, kdy dochází k největší účinnosti z důvodu nulové infiltrace. V případě že k infiltraci dochází snižuje se tím účinnost rekuperace.

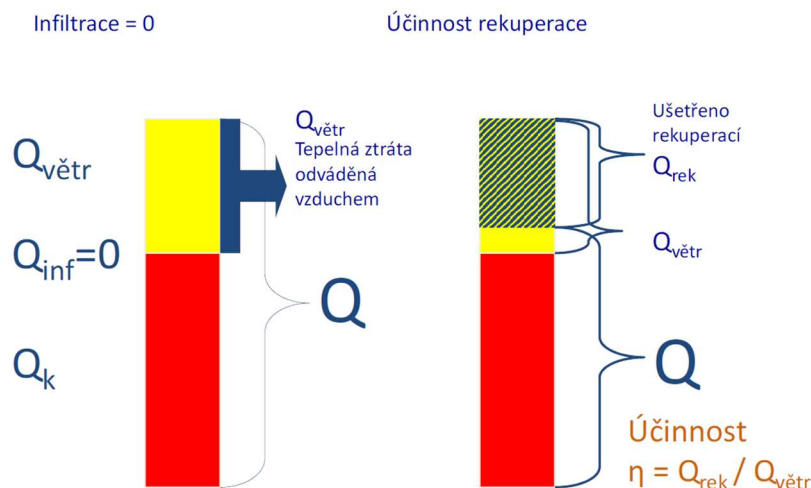


Schéma 9 Závislost průvzdušnosti objektu na účinnosti rekuperace [22]

7.3 LEGISLATIVA V OBLASTI VĚTRÁNÍ BUDOV

Výměna vzduchu v místnostech se prokazuje tzv. intenzitou výměny vzduchu n [h^{-1}]. Hodnotí se výměna vzduchu v místnostech nebo vnitřních prostorách podle jejich účelu, za tlakových podmínek odpovídající běžnému provozu a při provozní těsnosti funkčních spár.

V neužívaných místnostech nebo v době kdy místnost není užívána se doporučuje nejnižší intenzita výměny vzduchu v místnosti, taková, aby splňovala při zimních návrhových podmínkách podmínku:

$$n_{\min} \geq n_{\min,N}$$

- $n_{\min,N}$ je doporučená nejnižší intenzita výměny vzduchu v místnosti, v h^{-1} , po dobu, kdy není místnost užívaná, pokud jinak nestanoví zvláštní právní předpis, platí že $n_{\min,N}=0,1 h^{-1}$

V užívaných místnostech se výměna hodnotí za stejných návrhových podmínek. Intenzita poté musí splňovat podmínku:

$$n_N \leq n \leq 1,5n_N$$

- n_N je požadovaná intenzita výměny vzduchu v užívané místnosti
- pro obytné a obdobné budovy leží požadovaná intenzita výměny vzduchu mezi hodnotami $0,3-0,6 h^{-1}$
- pro pobytové místnosti se zpravidla požaduje zajistit nejméně $15 m^3/h$ na osobu při klidové aktivitě s produkcí metabolického tepla $80 W/m^2$
- v případě metabolické produkce nad $80 W/m^2$ se doporučuje nejméně $25 m^3/h$ [33]

Každá místnost by měla mít jinou intenzitu výměny vzduchu a jiný průtok vzduchu za hodinu, a to zejména vzhledem rozdílného provozu v jednotlivých místnostech (viz. Tab. 11)

Tabulka 6 Množství vyměňovaného vzduchu v místnostech [28]

Místo	Průtok vzduchu [m ³ /h]	Intenzita výměny [1/h]
Kuchyň	150 100-120	3 – plynový sporák 3 – elektrický sporák
Obytná místnost	3 na 1 m ² podlahy	min 0,5
Koupelna	60-150	3-5
Wc	25-50	3-5

Na přirozené či nucené větrání pamatuje i vyhláška č.20/2012 Sb. Kterou se mění vyhláška č. 268/2009 Sb. O technických požadavcích na stavby. Ta taktéž uvádí že by v pobytové místnosti mělo být zajištěno dostatečné větrání, buďto přirozené nebo nucené stejně jako v případě normy ČSN 73 0540 a to 25 m³/h na osobu, nebo minimální intenzitou 0,5 1/h. Jako ukazatel kvality prostředí slouží oxid uhličitý CO₂, jehož koncentrace ve vnitřním vzduchu nesmí překročit hodnotu 1500 ppm. Ve většině případů je kvalita vzduchu ve venkovním prostoru lepší jako v interiéru a limit na koncentraci CO₂ většinou nedosahuje limitních hodnot. [28]

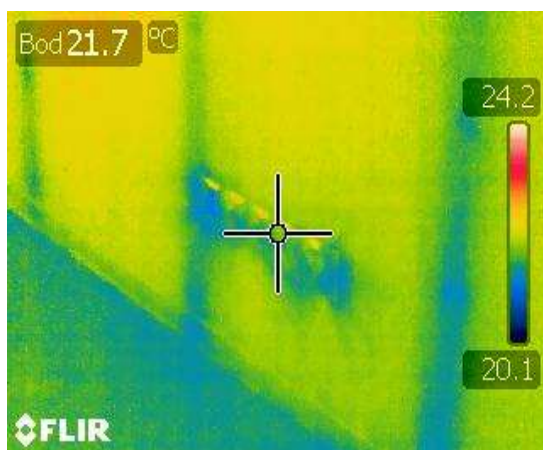
8 Vzduchotěsnost obálky budovy

Pojem vzduchotěsnost byl v čase minulem spojován téměř pouze s problematikou okenních spár či styků obvodových dílců u panelových budov. V současnosti se stále více ve výstavbě objevují lehké skládané konstrukce citlivé na netěsnosti v obvodovém plášti. Typickou konstrukcí jsou dřevostavby či podstřešní obytné prostory. [29]

O celkové vzduchotěsnosti objektu jako celku, rozhoduje vzduchotěsnost jednotlivých dílů materiálů a jejich spojů, které mají tvořit vzduchotěsný obvodový plášť. Vzduchotěsností se rozumí schopnost určitého prvku, v tomto případě obálky budovy nebo její dílčí části propouštět vzduch. K tomu, aby daný prvek propouštěl vzduch, je zapotřebí splnění dvou základních podmínek: [29]

- musí obsahovat určité netěsnosti lépe řečeno místa kudy vzduchu může proudit
- musí být vystaven tlakovému rozdílu, tj. rozdílný tlak vzduchu v prostředích která tento prvek odděluje, např. interiér a exteriér.

K netěsnosti v obálce budovy, nedochází většinou z důvodu nekvalitních materiálů. Daleko problémovější bývají netěsnosti v kritických konstrukčních detailech. Ty vznikají zejména nekvalitní realizací. Jeden z nich je patrný z ilustrace 15. Za pomoci snímku z termovize při provádění Blowerdoor testu v objektu je z ilustrace 15 patrné nekvalitní provedení styku koncového elementu elektroinstalací a obvodové konstrukce.



Ilustrace 15 Termovizní snímek při provádění Blowerdoor testu (pro představu uvedena i ilustrace reálného místa)

Stanovení vzduchotěsnosti objektů se dá spolehlivě určit pouze měřením. To se provádí již zmiňovaným Blowerdoor testem. Jedná se o takzvanou tlakovou metodu, dle ČSN EN ISO 13829. V oblasti dveřního otvoru se osadí vzduchotěsná plachta a do otvoru v plachtě ventilátor. Úkolem ventilátoru je zajistit v budově podtlak, respektive přetlak. Zařízení je napojeno na čidla, které pro každý tlakový rozdíl změří průtok vzduchu ventilátorem a předpokládá se, že stejný objem vzduchu protéká netěsnostmi v obálce budovy. Vyvolaný tlakový rozdíl by měl být bezpečně vyšší rozdíly vyvolané klimatickými vlivy. Ten se obvykle pohybuje mezi 20-80 Pa. Měření se provádí obvykle dvakrát, jednou při

přetlaku a podruhé při podtlaku v interiéru. Celkový princip zkoušky spočívá ve dvou metodách. První spočívá v měření těsnosti stavby v běžném provozním stavu. To znamená že jsou zavřena okna, dveře a např. i větrací mřížky. Ostatní otvory jako jsou komíny či kanalizace jsou ponechány v provozním stavu. Touto metodou ale nezjistíme, zda nedošlo k porušení vzduchotěsní vrstvy. Ta se zjistí druhou metodou při utěsnění již zmiňovaných konstrukcí. [29]



Ilustrace 16 Zařízení pro měření vzduchotěsnosti pomocí tzv. Blowerdoor testu

Výsledkem zkoušky je tzv. intenzita výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa, n_{50} . Doporučené hodnoty celkové intenzity výměny vzduchu $n_{50,N}$ uvádí norma ČSN 73 0540-2, viz tabulka 7.

Tabulka 7 Doporučené hodnoty celkové intenzity výměny vzduchu $n_{50,N}$

Větrání v budově	$n_{50,N} [h^{-1}]$
Přirozené	4,5
Nucené	1,5
Nucené se ZZT	1,0
Nucené se ZZT (pasivní domy)	0,6

9 Typy obvodových konstrukcí z hlediska tepelné techniky

Hlavním rozdělením, co se týče tepelně vlhkostního namáhání jsou:

- difúzně uzavřené konstrukce
- difúzně otevřené konstrukce stěn

9.1 Difúzně uzavřená konstrukce

Difúzně uzavřená konstrukce dřevostavby je klasickou neboli více zažitou konstrukcí. Z hlediska stavební fyziky můžeme hovořit o omezení, respektive úplném zamezení prostupu vodních par konstrukcí. Tuhle funkci plní kvalitní parozábrana, která se instaluje co nejbližší k interiérové straně.

Výhodou těchto konstrukcí je hlavně znalost systému realizačních firem jsou prostě více zažity a v praxi vyzkoušeny a z hlediska ceny za dílo relativně levnější jako difúzně otevřené skladby.

Největší nevýhodou difúzně uzavřené skladby konstrukce je že v podstatě celý systém závisí na vrstvě parozábrany.

Problémy, které mohou zhoršit funkci parotěsnící vrstvy:

- porušení nesprávným následným užíváním objektu (porušení v případě instalace zavěšených předmětů)
- nesprávnou realizací samotné parozábrany (spojování nebo napojování na ostatní konstrukce či řešení prostupů, kapitola 8)
- špatný návrh materiálu parotěsnící vrstvy

Všechny tyto aspekty mohou mít takřka fatální následky na životnost celé konstrukce.

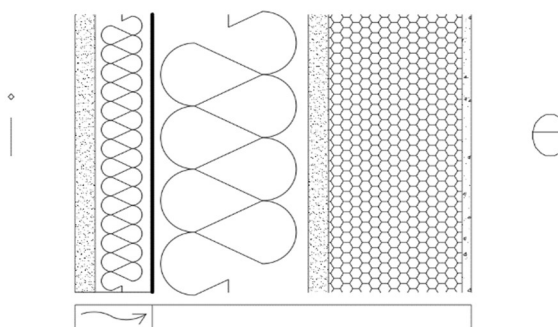


Schéma 10 Řez difúzně uzavřenou konstrukcí

V případě existence difúzního toku, který směřuje do oblastí s menšími parciálními tlaky, respektive když je pára schopna pronikat materiálovými vrstvami a klimatické podmínky jsou na obou stranách konstrukce (interiér/exteriér) rozdílné, dochází k difúzi vodní páry konstrukcí a v případě že dosáhne oblasti kdy je teplota pod teplotou rosného bodu dochází k tzv.

vmezežené kondenzaci. A ta je právě tou největší hrozbou v případě dobře fungující dřevostavby s dlouhou životností.

S tím že by mohl nastat tento problém se myslí v návrhu tloušťky vnějšího kontaktního zateplovacího systému v tom smyslu, pokud by mělo dojít ke kondenzaci v konstrukci tak ať je rosný co nejdále od interiéru, respektive co nejdále od nosné konstrukce dřevostavby lepe řečeno maximálně někde na vnější straně použitého izolantu.

9.2 Difúzně otevřená konstrukce

Difúzně otevřené konstrukce však už při návrhu počítají s tím, že bude umožněno průchodu molekul vodní páry konstrukcí, a to zejména použitím

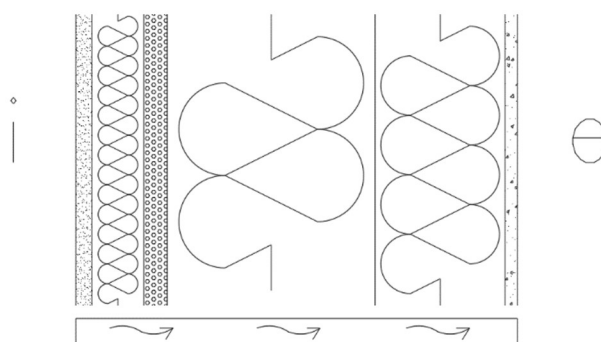


Schéma 11 Řez difúzně otevřenou konstrukcí s úplnou absencí parotěsnicí vrstvy

vhodné kombinace materiálů. V této konstrukční variantě vůbec v konstrukci nebráníme průchodu vodní páry to znamená, že nepoužijeme žádný materiál, který by nějakým způsobem tomuto bránil. Další variantou je použití tzv. parobrzdy která brzdí, respektive reguluje průchod vodní páry z interiéru do exteriéru.

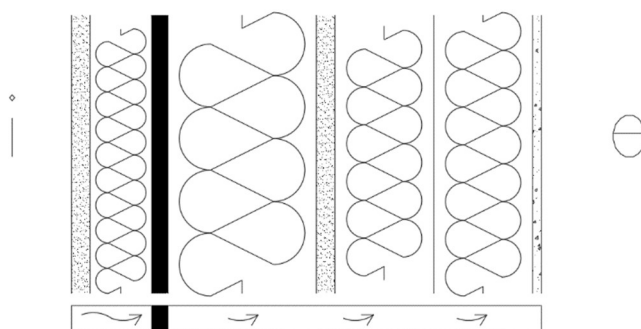


Schéma 12 Řez difúzně otevřenou konstrukcí s použitím

U obou těchto případů se však držíme základního principu difúzně otevřené konstrukce, a to že difúzní odpor materiálůvých vrstev by měl směrem od interiéru k exteriéru klesat, respektive by neměla difundující pára v konstrukci narazit na vrstvu, která by ji nějakým způsobem bránila v cestě.

Nejběžnější je použití deskových materiálů na opláštění z interiérové strany s vyšším difúzním odporem (hodnota $S_d =$ cca 4 m) tento požadavek splňuje celá řada sádrovláknitých desek nebo OSB desek určených právě pro tuto funkci. [30]

Co se týče tepelně izolačních materiálů v difúzně otevřených konstrukcích, používají se difúzně propustné např. minerální vlny s optimálním faktorem difúzního odporu. Stejně na tom jsou omítkové systémy, které taktéž musí být vysoce prodyšné. [30]

10 Netradiční stavební materiály pro současné stavby dřevostaveb

10.1 Sláma

Sláma je odpadním produktem při zpracování obilovin, která je při slisování do balíku dále využívána v zemědělství. Další alternativou využití je v moderním stavebnictví.

Největší výhodou v použití slamy jako tepelné izolace je z hlediska environmentálního z hlediska přírodního původu, poté nízká cena, dobré izolační vlastnosti a dlouhodobá životnost dosahující až sta let při správném použití. [31]

Staveb, které využívají dobrých tepelně technických vlastností slámy v české republice přibývá, ale stále se na něj pohlíží v podstatě jako na experimentální stavby. [31]

Základní prvkem je většinou malý balík o přibližných rozměrech 350/400/600 mm o součiniteli tepelné vodivosti při objemové hmotnosti 90 kg/m^3 v rozmezí $\lambda = 0,052 - 0,08 \text{ W/m} \cdot \text{K}$, záleží na orientaci stébel. [31]

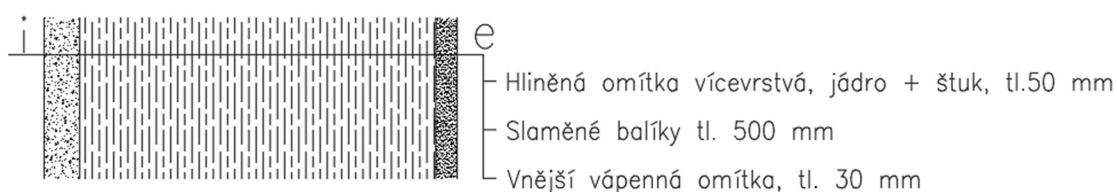


Schéma 13 Řez stěnou s tepelnou izolací ze slámy [28]

Sláma se také dobře vyrovnává s vlhkostí, tím mám na mysli s relativní vlhkostí prostředí, v kterém je v kontaktu. Měřením bylo prokázáno že do 90 % relativní vlhkosti prostředí slaměná izolace netlí a do 80 % nemůže dojít k biologickému růstu mikroorganismů a plísní v balících. [31]

Jeden z projektů zabývajících se požární odolností slaměných konstrukcí, byl zpracováván v české republice v roce 2011 na katedře konstrukcí pozemních staveb Fakulty stavební ČVUT v Praze. [32]

Závěreční vyhodnocení zkoušky vypovídalo o tom že obě testované skladby využívající slámu jako tepelnou izolaci, respektive jako nosný prvek splňující

normové požadavky na požární odolnost nosných obvodových plášťů (REI 120 DP3 a REI 60 DP3). [32]

Přesto že je sláma jako taková v porovnání s běžnými tepelnými izolacemi velmi nízká, avšak z pohledu ekonomiky stavby jako celku je při reálné době zpracování a reálných cenách práce už tak ekonomicky přívětivě nevychází. To je jeden z mnoha důvodů, v kterém nejsem o tento druh materiálu může spočívat. [32]

V Evropě však přesto všechno vzniklo několik firem zabývajících se zpracováním slamy pro stavební účely. Například jednou z nich je firma Ekopanel, která se zabývá průmyslovým zpracováním slámy do formy

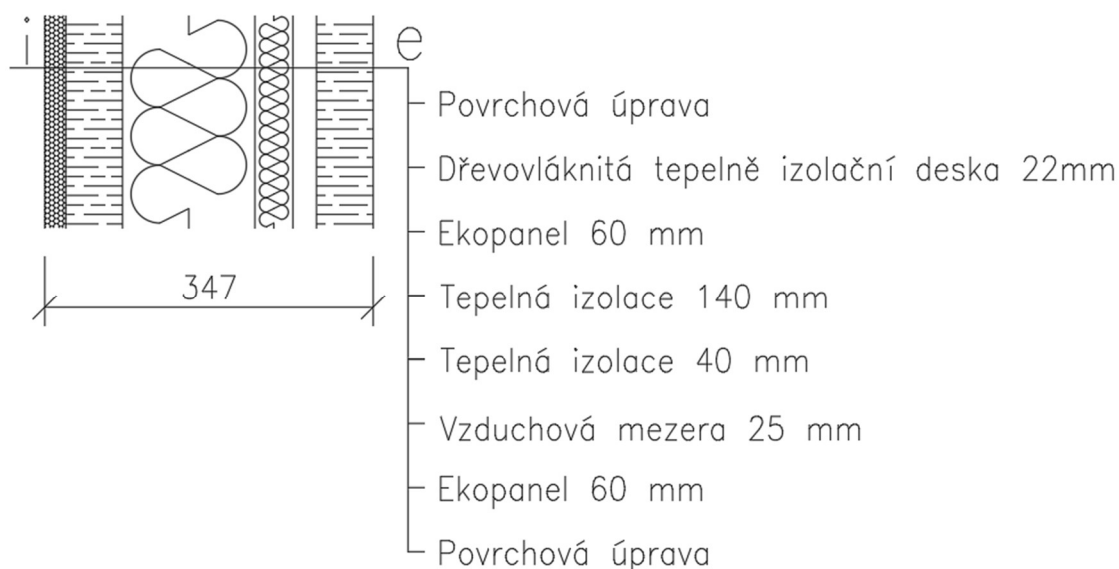


Schéma 14 Obvodová stěna EKO 2 ($U=0,156 \text{ W/m}^2\text{K}$)

slámokartonových panelů používaných pro suchou výstavbu například příček, opláštění stěn, stropů, podhledů. Panely se poté povrchově upravují stejně jako sádkartony. Ekopanel se vyrábí v dvou základních tloušťkách 60 a 40 mm se součinitelem tepelné vodivosti $\lambda=0,099 \text{ W/m.K}$. [33]

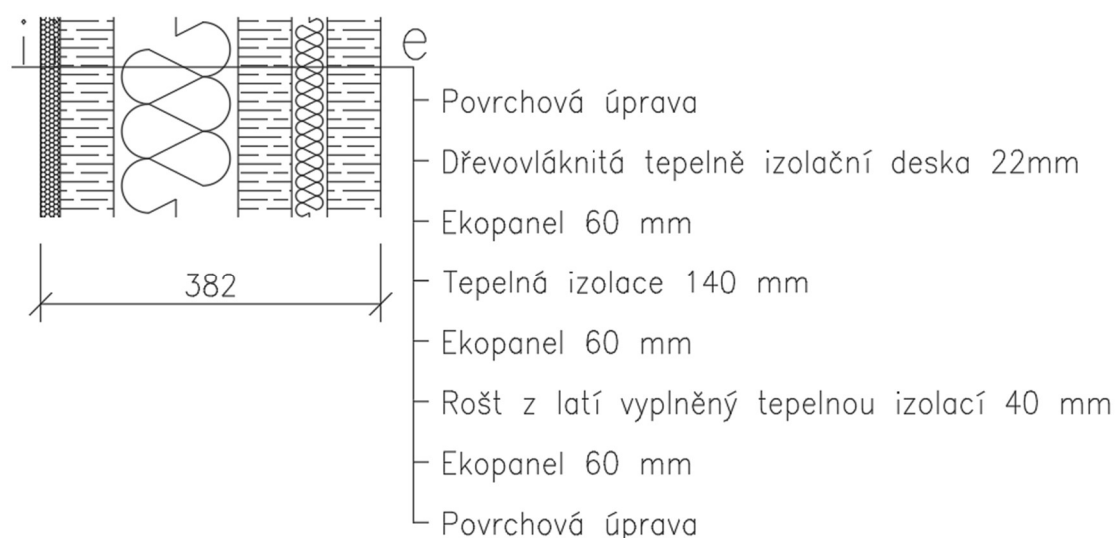


Schéma 15 Obvodová stěna EKO 3 ($U=0,143 \text{ W/m}^2\text{K}$)

Společnost Ekopanely se zaměřují na systémové řešení celé stavby, řešenou většinou jako sendvičové konstrukce mimo jednoduchých příček. [33]

10.2 Hlína

Nepálená hlína ve formě hliněného staviva byla v podstatě používána až do začátku 20. století, kdy jej postupně nahradila cihla pálená. V dnešní době se hlína nabírá na atraktivitu, a to nejen díky environmentálnímu hledisku ale také kvůli její fyzikální vlastnosti regulovat vzdušnou vlhkost, a to zejména ve formě hliněných omítek. Prodávají se jako klasické pytlované směsi pro smíchání s vodou a nanášení buď to strojně nebo ručně. [31]

10.3 Konopí

Konopí je hojně využíváno spíše v jiných odvětvích jako je například textilní průmysl, výroba lan, v papírenství. Využití však nachází i v oblasti izolačních materiálů na bázi technického konopí. Jsou vyráběny z konopného vlákna s většinovým podílem konopného pazdeří, často doplněna o umělá bikomponentní vlákna na bázi polyesteru, která slouží především k lepší provázanosti a kompaktnosti hotového výrobku. Takováto izolace vykazuje dobré tepelně izolační, mechanické i akustické vlastnosti. Součinitel tepelné vodivosti se pohybuje od 0,039-0,050 W/mK. Objemová hmotnost technického konopí je 24-42 kg/m³. Nevýhodou konopní izolace je její hořlavost, kdy je zařazena do třídy reakce na oheň E. Další nevýhodou je její cena oproti ostatním tepelným izolantům. [31]

Vysoká objemová hmotnost společně s měrnou tepelnou kapacitou mají velký vliv na akumulaci vlastností tepelně izolační vrstvy. Tento faktor bude velice důležitý právě u dřevostaveb. Čím je objemová hmotnost a měrná tepelná kapacita vyšší zvyšuje se právě tepelná akumulace a s tím i tedy teplotní setrvačnost. To má za následek větší fázový posun, který pozitivně ohodnotíme zejména v horkých letních dnech, proto se konopná izolace využívá hojně i v podkrovních místnostech. [34]

Fyzikálními vlastnostmi je srovnatelná s dřevovláknitou izolací.

10.4 Ovčí vlna

Jedná se o odpadní produkt při chovů ovcí. K nám se tento produkt dováží vlna rakouská, australská nebo také novozélandská. V tomto případě se sice jedná o přírodní produkt, ale musíme zde pamatovat na vysokou produktivitu emisí spojenou s dovozem. I cena vzhledem k transportu není zrovna nízká v porovnání s ostatními izolacemi. Před zpracováním se vlna průmyslově čistí od tuku a přidávají se příměsi proti hoření a ochraně proti molům. Po domácímu zpracované vlny a použití jako tepelné izolace se nedoporučuje právě z důvodu velké náchylnosti na napadení moly a také kvůli nehygienickému zápachu. Třída reakce na oheň je C3. Vlna se průmyslově zpracovává do tepelněizolačních rohoží různých tloušťek. [31]

Výhody použití ovčí vlny jako tepelné izolace:

- Je samozhášivá (po vyjmutí z ohně sama zhasne)
- Dokáže vyrovnávat vlhkost vnitřního prostředí

11 Cíle práce

1. Analýza vnitřního mikroklimatu bytových staveb bez nuceného větrání a vlivů působících na tepelně vlhkostní procesy
2. Numerická tepelně vlhkostní analýza vybraných obvodových konstrukcí dřevostaveb
3. Experimentální ověření způsobu lokální perforace parozábrany na hodnotu difúzního odporu

Rámcová metodika pro naplnění cílů práce

1. Analýza vnitřního mikroklimatu bytových staveb bez nuceného větrání a vlivů působících na tepelně vlhkostní procesy
 - charakteristika jednotlivých prostor podléhající analýze
 - Popis měřicího přístrojového vybavení pro naplnění cílů
 - experimentální měření vnitřního mikroklimatu vybraných bytových staveb pomocí meteorologických dataloggerů
 - grafická analýza získaných dat
2. Numerická tepelně vlhkostní analýza vybraných obvodových konstrukcí dřevostaveb
 - volba typových konstrukcí, aby pokryla co největší spektrum skladeb realizovaných v České republice
 - možnosti posouzení jednotlivých konstrukcí z pohledu českých technických norem
 - Numerická tepelně vlhkostní analýza ve vybraných softwarech
3. Experimentální ověření způsobu lokální perforace parozábrany na hodnotu difúzního odporu
 - Metody pro stanovení difúzních vlastností materiálů
 - Příprava vzorků s různou lokální perforací pro experimentální měření
 - Periodické vážení vzorků a sledování přírůstku hmotnosti
 - Vyhodnocení experimentálního měření
 - Vliv difúzního odporu lokálně perforované vrstvy foliové parozábrany na tepelně vlhkostní chování konstrukce

12 Analýza vnitřního mikroklimatu bytových staveb

V následující části bude popsána metodika práce pro naplnění dílčích cílů práce a následné výsledky daného cíle. Pro experimentální měření byly vybrány dvě bytové stavby podobného charakteru, jmenovitě obytné podkroví v Brně a Kyžlířově.

12.1 Metodika pro naplnění dílčího cíle

Přístrojové a softwarové vybavení

Jedním ze způsobů pro kontrolu kvality vnitřního prostředí mohou být meteorologické datalogery. Pro experimentální měření v rámci diplomové práce byl fakultou poskytnut meteorologický datalogger Voltcraft DL-181THP.



Ilustrace 17 Datalogger Voltcraft DL-181THP

Kompaktní bateriemi napájený datalogger je vybaven vestavěnými senzory teploty, relativní vlhkosti vzduchu a atmosférického tlaku. Měřená data se automaticky ukládají v intervalu od 2 sekund do 24 hodin. Pro jedno měření může být uloženo maximálně 32 754 naměřených hodnot tj. 10 915 pro každou měřenou veličinu. Zařízení je chráněno proti stříkající vodě a vlhkosti tudíž je jej možné používat i v exteriéru či vlhkých provozech.

Vyhodnocení naměřených dat probíhá pomocí vyhodnocovacího programu, který se nainstaluje do počítače a pomocí běžného USB rozhraní data importují. Stejným způsobem probíhá i nastavení přístroje.

Postup měření

Jako první proběhlo nainstalování software a nastavení zařízení. Nastaven byl aktuální čas, jakým způsobem se zahájí měření a snad to nejdůležitější interval měření. Interval pro provedení záznamu byl zvolen periodicky každých 15 min.

Po naprogramování a spuštění všech čtyř zařízení ve stejný čas byly datalogery ponechány měřit 24 hodin v jedné místnosti na stejném místě pro eliminování chyby měřícího zařízení.

Po vypočtení chyby byly datalogery rozmístěny do jednotlivých místností. Měřící místa byla volena takto:

- místnost se zvýšeným počtem osob, zařízení či procesu ovlivňující teplotu a relativní vlhkost to jsou např. obývací pokoje s nebo bez kuchyňského koutu či kuchyně
- prostory se zvýšenou vlhkostí, tj. koupelna
- zóny tzv. klidové sloužící ke spánku, tj. pokoj nebo ložnice
- exteriérová část bytu/domu

Prostor, respektive místo, na které se datalogery umístí, nesmí v průběhu měření ovlivňovat výsledky měření, tím je myšleno například umístění zařízení na nasákové povrchy kde by hodnoty relativní vlhkosti mohly být zavádějící.

Experimentální měření v podkroví mezonetového bytu v Brně

Velikost bytu je 5+kk. V přízemí jsou dva pokoje, koupelna s Wc a obývací pokoj s kuchyňským koutem. V patře se nachází dva pokoje. Byt obývá celkem sedm osob. Podkroví bylo realizováno před cca 15 lety a podle vizuální stránky a pocitových podmínek při obývání, asi ne moc kvalitně. Vytápění bytu je elektrickými přímotopy v každém pokoji. Obývací pokoj je vytápěn tepelným čerpadlem. Koupelna je pouze temperována.

Rozmístění dataloggerů:

1. Pokoj
2. Obývací pokoj
3. Koupelna (vana+sprcha)

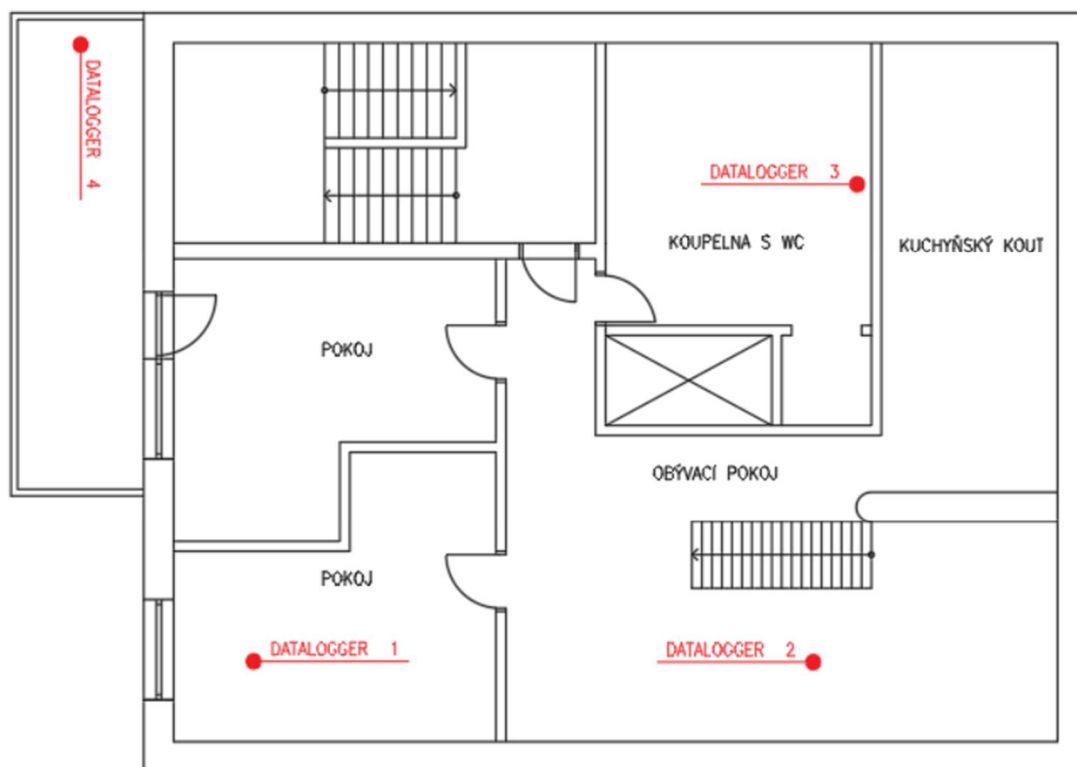


Schéma 16 Umístění dataloggerů v bytě Brno

4. Balkón

Dataloggery byly nastaveny dle již zmiňovaných intervalů po dobu 20 dní. Od 5.11.2016-25.11.2016.

Experimentální měření v podkroví rodinného domu v Kyžlířově

Měření probíhalo v nástavbě staršího rodinného domu, která byla před pěti lety zrealizována pro využívání podkrovních částí. Velikostně se jedná o 4+kk. Obývací pokoj s kuchyňským koutem, třemi pokoji a koupelnu s WC. Nástavba byla dokončena před 5 lety. Vytápění je ústřední kotlem na tuhá paliva.

Rozmístění dataloggerů:

1. Pokoj
2. Obývací pokoj
3. Koupelna (vana+sprcha)
4. Balkón

Dataloggery byly opět nastaveny dle stejných intervalů. Tentokrát doba měření byla 20 dní. Od 29.11.2016-26.12.2016.

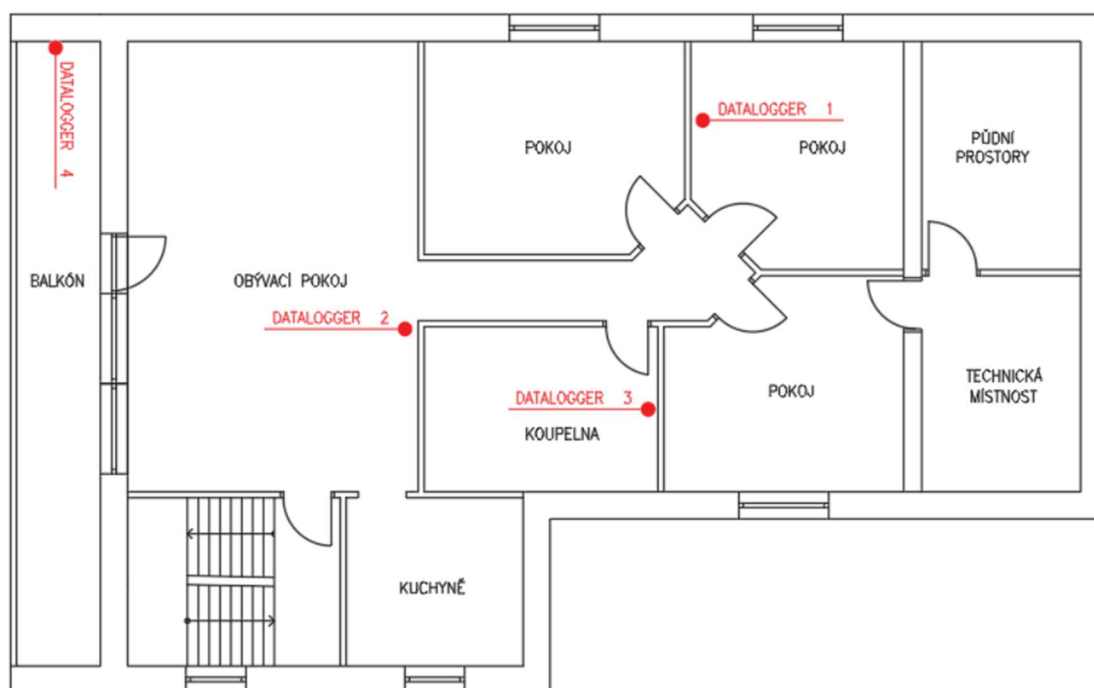
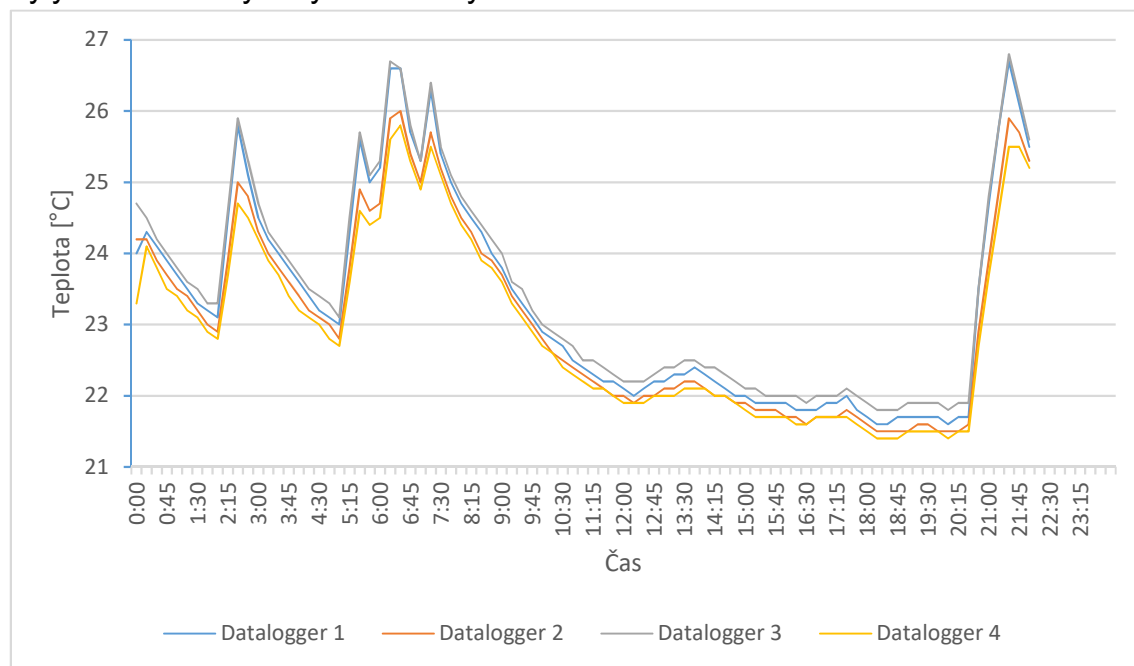


Schéma 17 Umístění dataloggerů v podkroví Kyžlířov

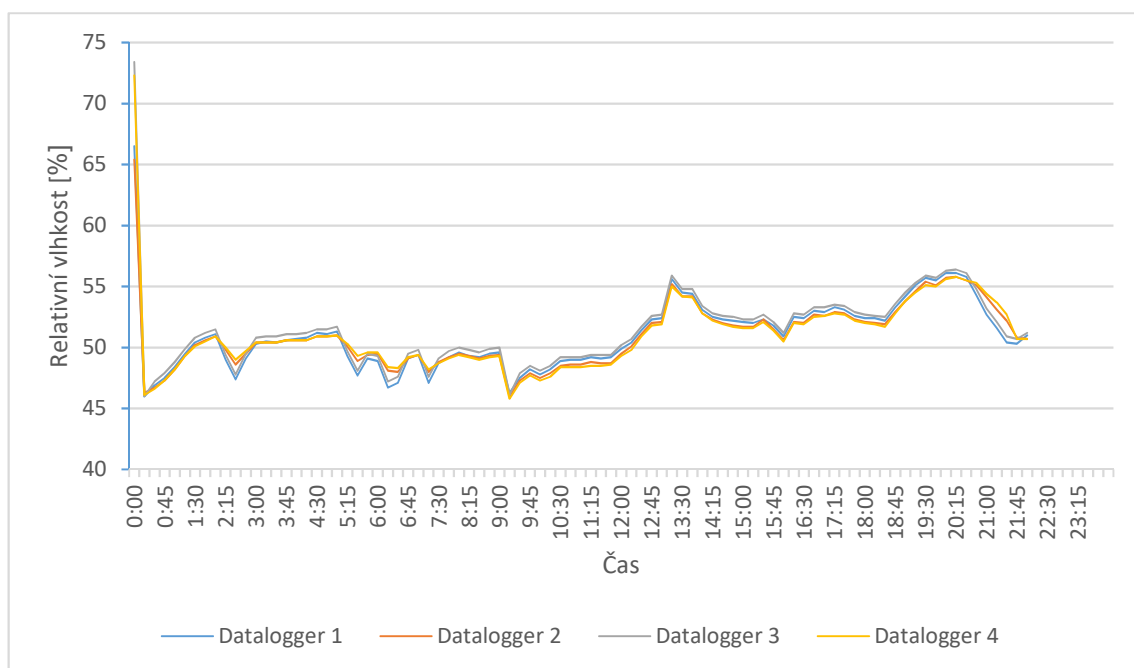
12.2 Dílčí výsledky experimentálního měření vnitřního mikroklimatu vybraných bytových staveb

Kalibrace měřicího zařízení vnitřního mikroklimatu

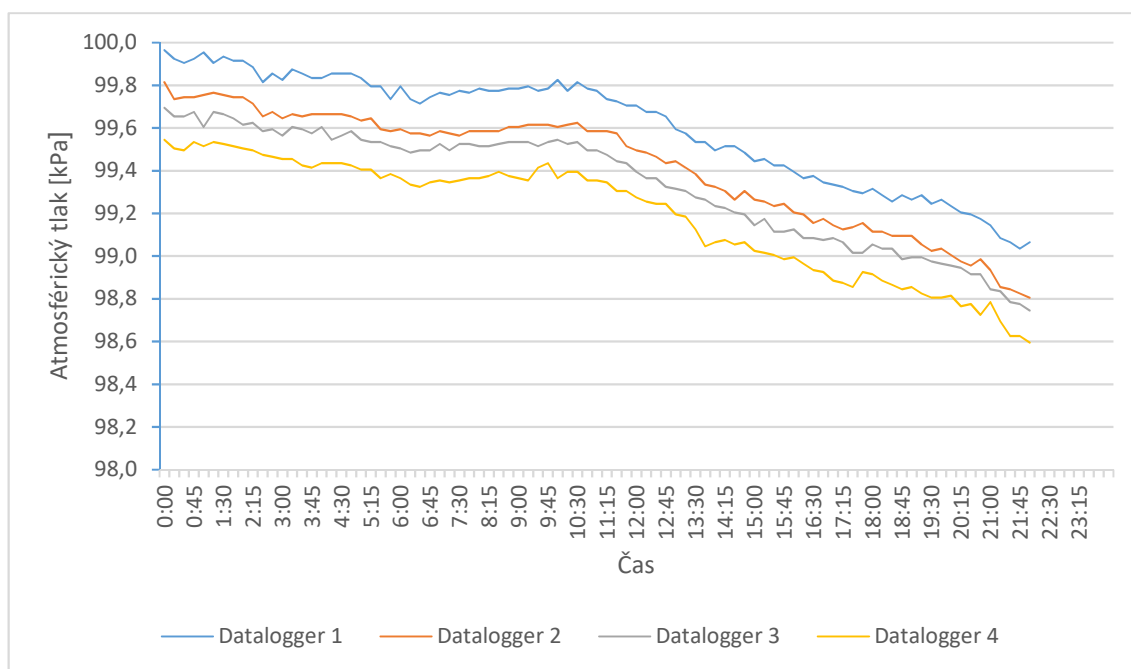
V rámci přípravy měření vnitřního mikroklimatu proběhla zkouška správného nastavení a odchylka v měření jednotlivých dataloggerů. Dataloggery byly ponechány v jedné místnosti společně na shodném místě po dobu 22 hodin. Interval záznamu hodnoty teploty byl nastaven opět na 15 minut. Po 22 hodinách byly data staženy a vyhodnoceny.



Graf 5 Záznam průběhu teploty vzduchu za 22 hodin na jednotlivých zařízeních



Graf 4 Záznam průběhu relativní vlhkosti vzduchu za 22 hodin na jednotlivých zařízeních



Graf 6 Záznam průběhu atmosférického tlaku vzduchu za 22 hodin na jednotlivých zařízeních

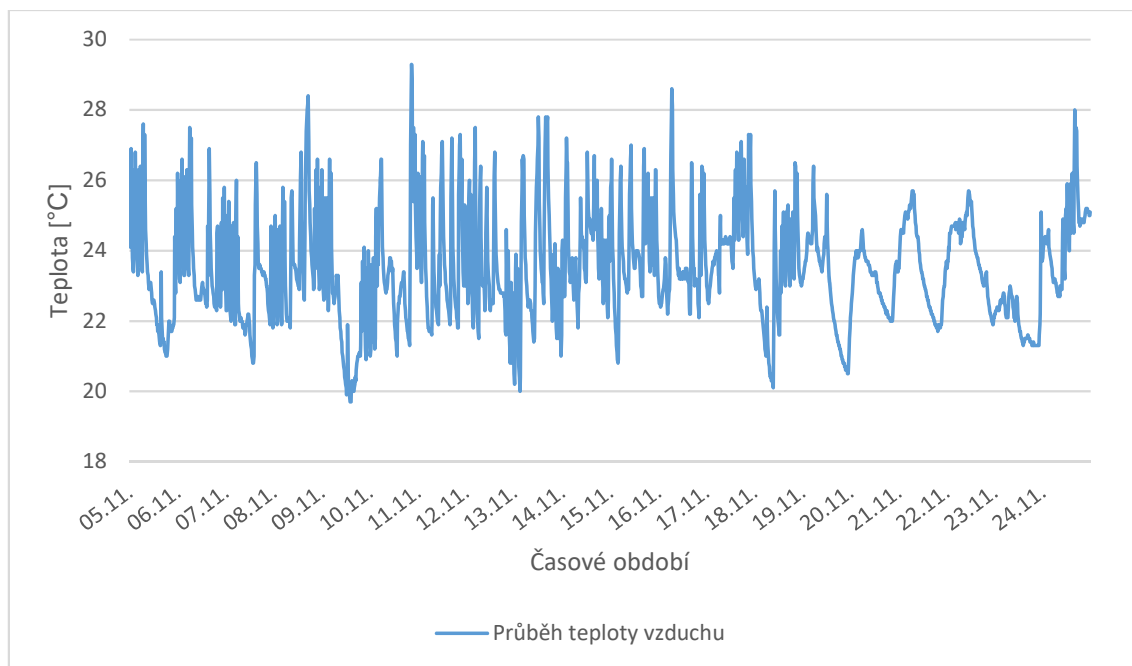
Z grafů je patrné že jednotlivá zařízení vykazují určitou vzájemnou odchylku v měření. Proto byla vypočtena směrodatná odchylka každého zařízení viz tabulka 8.

Tabulka 8 Výpočet směrodatné odchylky

Datalogger	Směrodatná odchylka v měření teploty [°C]	Směrodatná odchylka v měření relativní vlhkosti [%]	Směrodatná odchylka v měření atmosférického tlaku [kPa]
1	-0,1	+0,1	-0,2
2	+0,1	+0,1	+0,0
3	-0,2	-0,3	+0,1
4	+0,2	+0,1	+0,2

Výsledky měření vnitřního mikroklimatu v mezonetovém podkrovním bytě v Brně

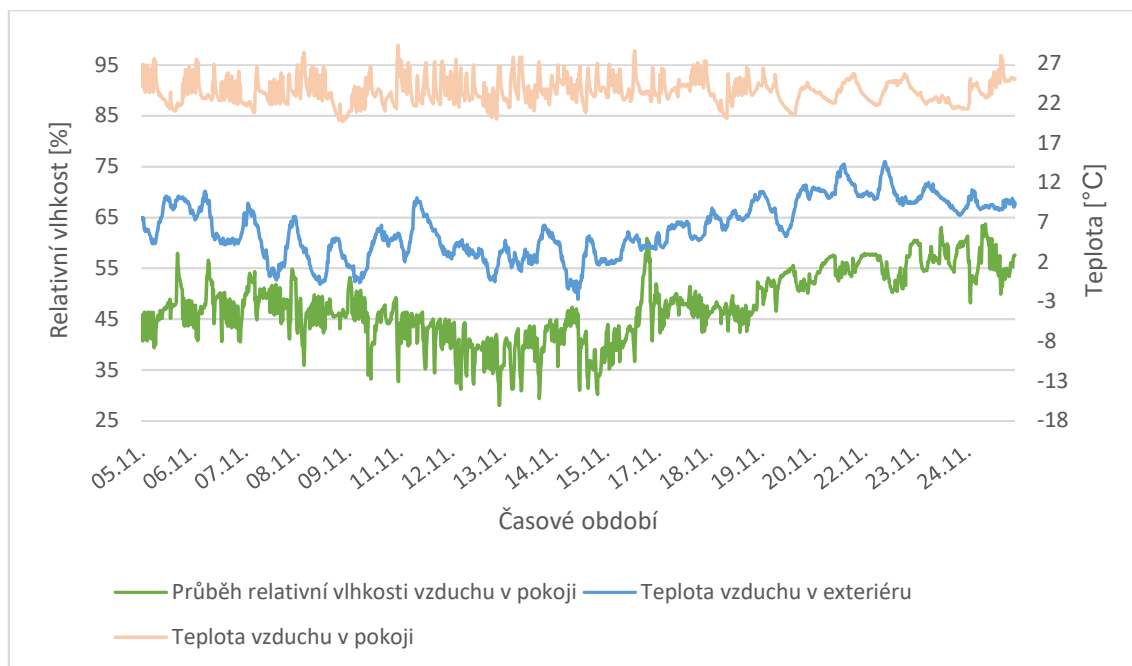
Po ukončení měření byly data graficky zpracovány. V rámci diplomové práce byl vybrán vždy jeden prostor, který byl dále po technické stránce rozebrán. Jak vypadala forma prvopočátečního grafického zpracování po ukončení měření je zobrazeno na grafu 7. Výsledky měření ostatních prostor, které podlely experimentálnímu měření, viz přílohy diplomové práce.



Graf 7 Průběh teploty vzduchu v pokoji za sledované období

Pro přehlednost budou dále uváděny pouze hodnoty, které jsou pro danou místnost něčím specifické, respektive hodnoty, které by mohly vykazovat nebo vykazující určitý diskomfort v prostředí, popřípadě hodnoty, které poukazují na jistou skutečnost atd. Skutečné průběhy sledovaných veličin v časovém kroku 15 min či průměrné denní hodnoty veličin, viz *přílohy* diplomové práce.

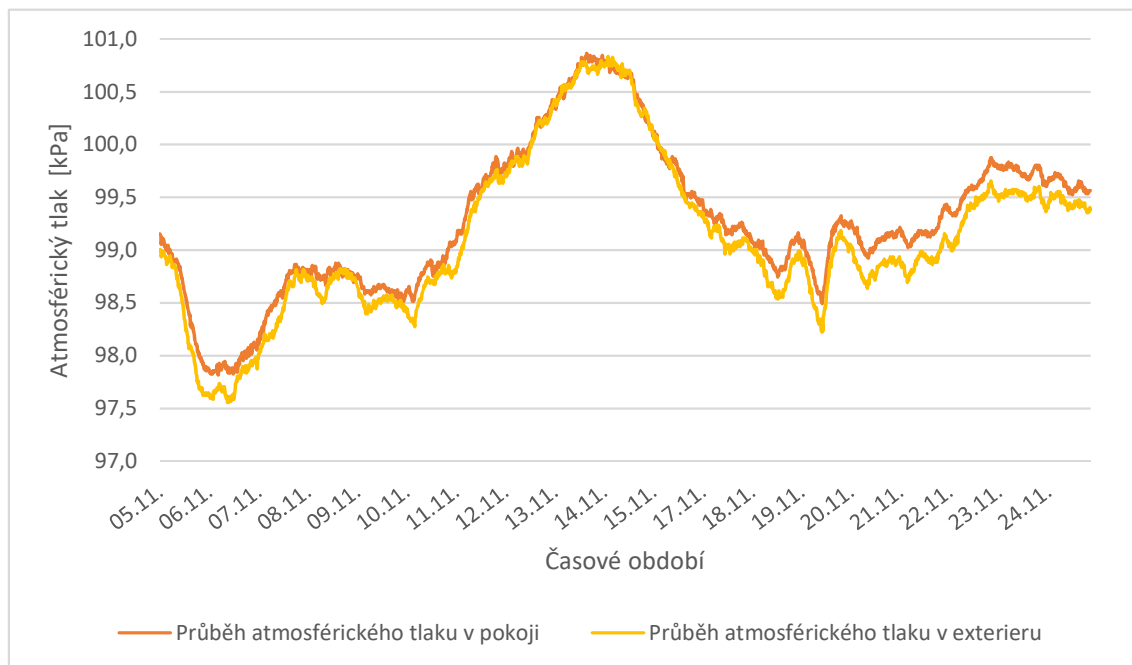
Závislost relativní vlhkosti v interiéru na teplotě v exteriéru je zobrazena na grafu 8. Chladný vzduch má malou kapacitu pojmout vodu ve formě vodní páry, to má za následek důvod, proč je v zimě venku sice vysoká relativní vlhkost, ale vodní páry je ve vzduchu obsaženo velice málo.



Graf 8 Závislost průběhu relativní vlhkosti vzduchu v interiéru na teplotě vzduchu v exteriéru

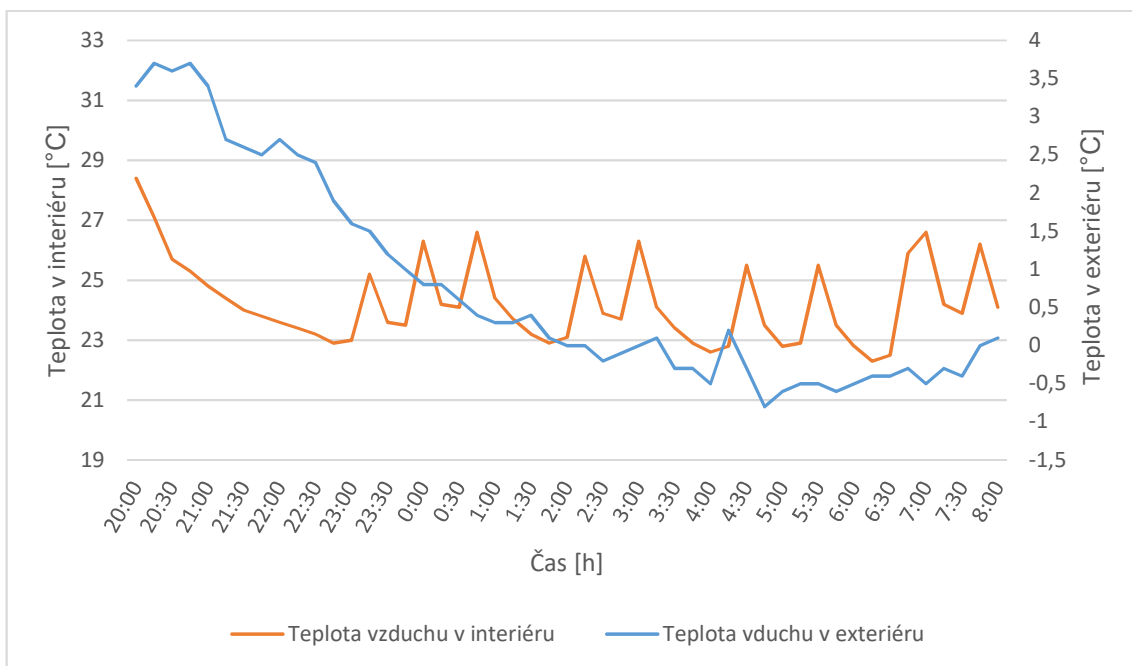
Ve starších objektech, kde dochází k velké infiltraci může být právě dobře viditelná souvislost mezi poklesem, respektive vzrůstem teploty v exteriéru a průběhem relativní vlhkosti v interiéru.

Ten samý jev, kde můžeme pozorovat velikost infiltrace je i na průběhu atmosférických tlaků v interiéru a exteriéru, kdy můžeme pozorovat, že hodnoty jsou ve většině případů totožné v obou případech. Viz graf 9.



Graf 9 Průběh atmosférického tlaku v pokoj a exteriéru

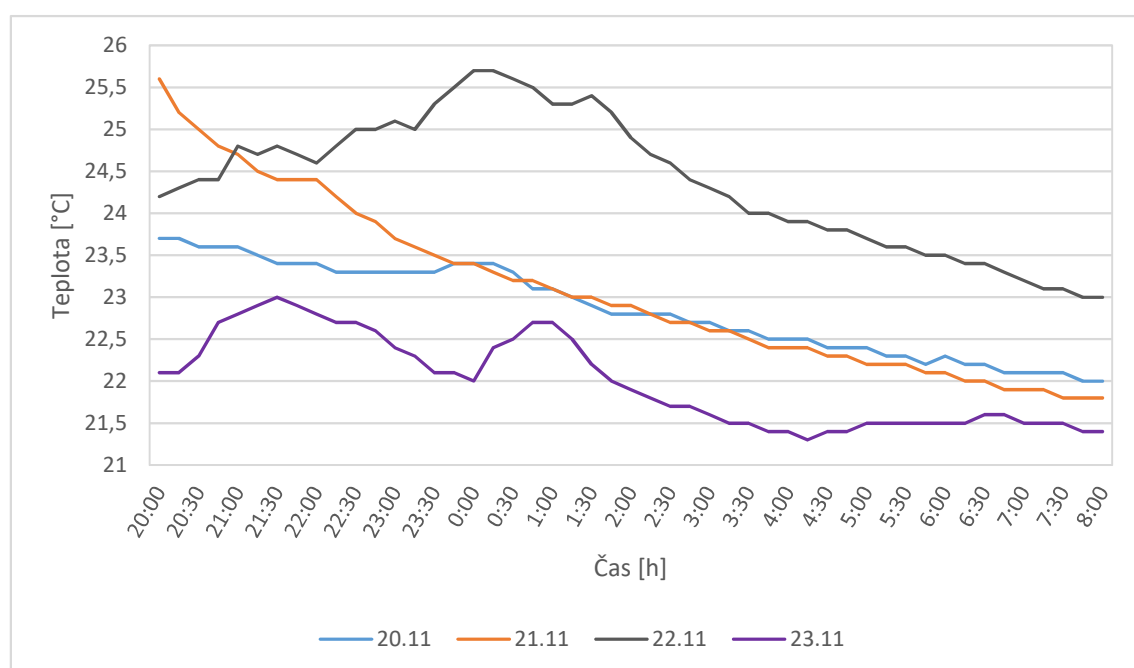
Pro přehlednost prezentovaných dat a snížení faktorů které by mohly více či méně ovlivnit výsledky následné analýzy, byl vybrán pouze jeden den vykazující průměrné hodnoty a pozornost byla věnována pouze dvanácti



Graf 10 Průběh teploty vzduchu v interiéru a exteriéru

hodinovému úseku od 20:00 hodin večer do 8:00 hodin ráno. Viz graf 10. V tomto časovém úseku je otopné těleso připojeno na časovač, který v nočních hodinách, spíná dle nastaveného intervalu, a to každých cca 30 minut na dobu 15 minut. Interval kdy otopné těleso běží a kdy ne je patrný na grafu 10. Tento časový úsek byl zvolen z důvodu snížení již zmiňovaných faktorů, které nám mohou teplotu v interiéru ovlivnit. Např. by to mohlo být vyšší množství osob v prostoru či nárazové větrání okny. V této části dne je obsazenost pokoje pořád stejná, tj. dvě osoby a k větrání dochází pouze infiltrací.

Další zajímavostí je, průběh teplot vzduchu v místnosti, kdy v období od 20.11 do 23.11 nebylo v provozu lokální topidlo a prostor byl do cca 24:00 hodin vždy vytápěn skrze otevřené dveře ohřátým vzduchem z obývacího pokoje. Viz graf 12.

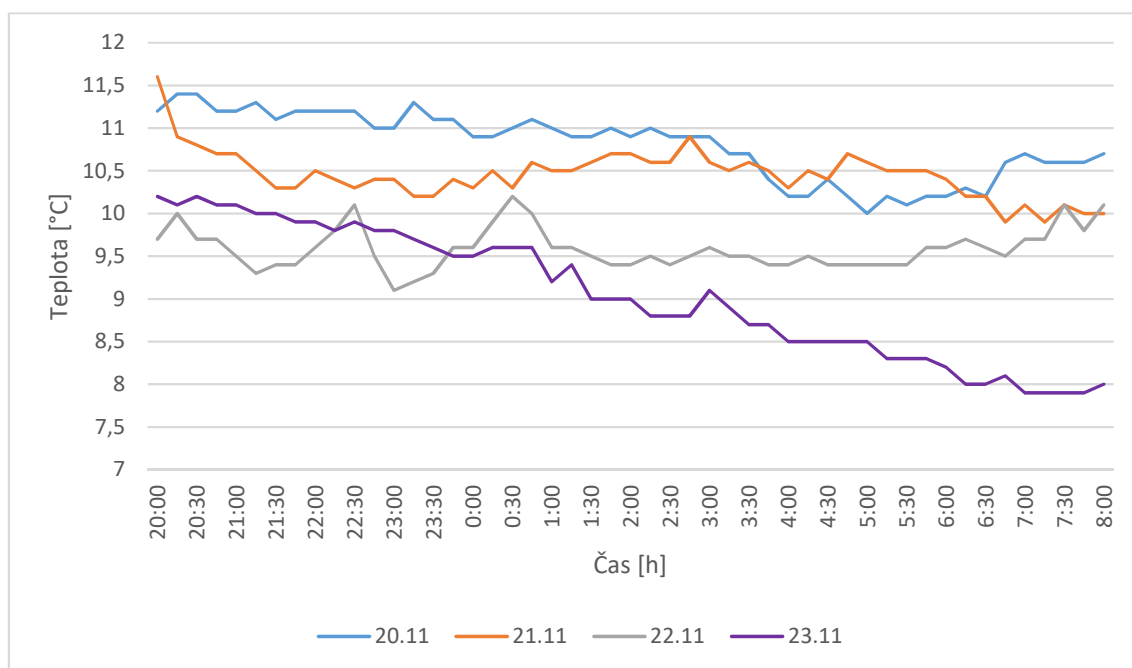


Graf 11 Průběh teplot v pokoji v období, kdy nedocházelo k vytápění prostoru lokálním topidlem

Teploty nevykazují tak značné výkyvy vlivem lokálního vytápění jako v případě jejího použití. V tomto období se venkovní teploty pohybovaly okolo 8 °C a jak patrné z grafu 11 i přesto že místnost nebyla přímo vytápěna teplota v prostoru byla dostatečně vysoká.

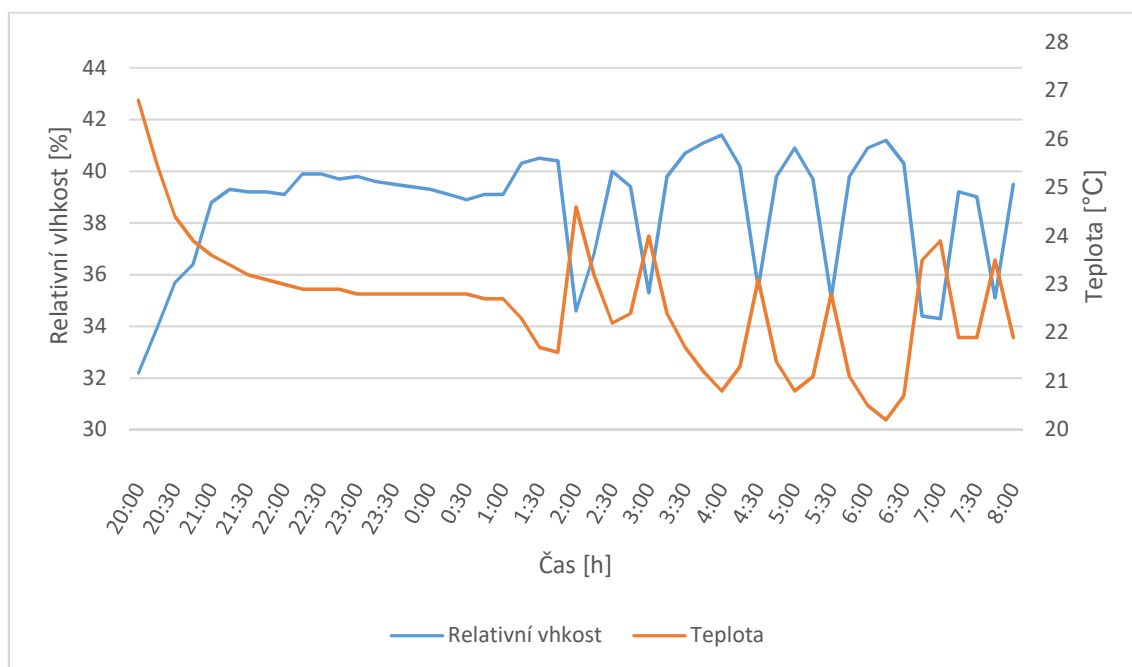
Pokud bychom se zaměřili na křivku ze dne 22.11 můžeme vidět, jak teplotu může ovlivnit dvounásobné množství osob v místnosti (4 osoby) kdy teplota stoupla o cca 2 °C a po opuštění těchto osob ze sledované místnosti teplota opět začala klesat jako v ostatních dnech.

Závislost venkovní teploty na vnitřní je patrné při porovnání grafu 11 a 13, které zobrazují průběh vnitřní a venkovní teploty vzduchu.



Graf 13 Průběh teploty vzduchu v exteriéru v období, kdy nedocházelo k vytápění vnitřního prostoru lokálním topidlem

Závislost relativní vlhkosti na teplotě je patrná z grafu 12. Zde můžeme vidět fakt, že pokud za stejných okrajových podmínek zvýšíme, respektive snížíme teplotu vzduchu v interiéru zároveň se nám bude měnit relativní vlhkost φ_a .



Graf 12 Závislost relativní vlhkosti na teplotě (pro demonstraci byl vybrán den 12.11.)

$$\varphi_a = \left(p_v / p_{v,sat} \right) \cdot 100 [\%], \quad (7)$$

kde

p_v *částečný (parciální) tlak vodní páry ve vzduchu o dané teplotě [Pa]*

$p_{v,sat}$ *částečný (parciální) tlak nasycené vodní páry při stejné teplotě [Pa]*

Teplejší vzduch pojme větší množství vodní páry jako studený vzduch. Z toho vyplývá že hodnota parciálního tlaku nasycené vodní páry $p_{v,sat}$ je závislá na teplotě.

$$p_{v,sat} = f(\theta) \quad (8)$$

Čím je teplota vzduchu vyšší, tím je vyšší i hodnota $p_{v,sat}$. Hodnoty parciálního tlaku nasycené vodní páry najdeme v normě ČSN 73 0540-3 v příloze K.2.

Pokud bychom se zaměřili spíše na konstrukce, které prostory s různými klimatickými podmínkami například exteriér a interiér oddělují zajímala by nás spíše vodní pára, respektive šíření vlhkosti stavebními konstrukcemi, ta se šíří na základě rozdílných parciálních tlaků, viz kapitola 2.1.

Z informací které známe, jmenovitě relativní vlhkost, teplota v interiér, exteriér a hodnoty $p_{v,sat}$, které jsou pro určitou teplotu uvedena v normě, můžeme vypočítat již zmiňované parciální tlaky vodní páry, které dané konstrukce oddělují.

$$p_{v,x} = (\varphi_x \cdot p_{v,sat,x}) / 100$$

kde (9)

$p_{v,x}$ *částečný (parciální) tlak vodní páry ve vzduchu o dané teplotě [Pa]*

$p_{v,sat,x}$ *částečný (parciální) tlak nasycené vodní páry při stejné teplotě [Pa]*

φ_x *relativní vlhkost [%]*

Z grafu 14 je patrné že dochází k difúznímu toku pouze z interiér do exteriér. Tento jev je typický zejména pro zimní období. Opak může nastat v letním období kdy se klimatické podmínky otočí, např. klimatizovaný interiér a vysoké letní teploty v exteriér.



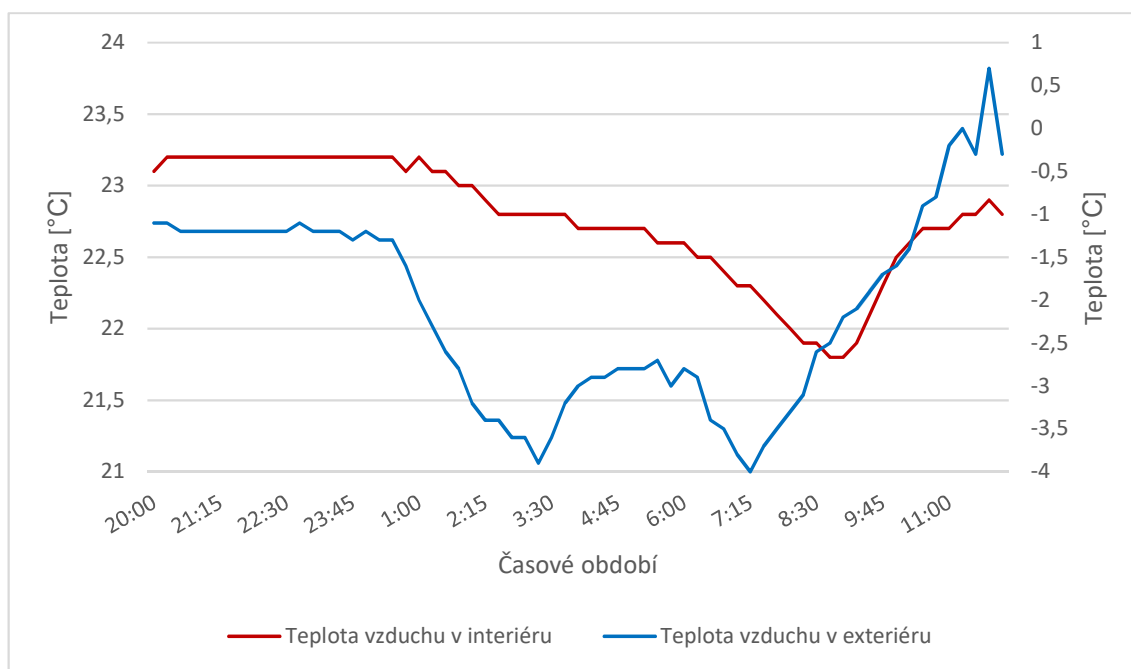
Graf 14 Rozdíl parciálních tlaků interiéru a exteriéru během sledovaného období

Výsledky měření vnitřního mikroklimatu v podkrovním bytě v Kyžlířově

Na předchozím vyhodnocení měření byly publikovány nejen určité zajímavosti z naměřených dat, ale také bylo poukázáno na určité skutečnosti v oblasti stavební fyziky např. závislost relativní vlhkosti a teploty.

V této části kapitoly vyhodnocení měření vnitřního mikroklimatu v podkrovním bytě v Kyžlířově se zaměříme opět na pokoj obdobný tomu předchozímu, kde proběhne srovnání naměřených dat obou případů. Závislosti jednotlivých veličin mikroklimatu mezi sebou dále rozebírány nebudou z důvodu toho, že bychom pouze potvrdily skutečnosti rozebírány v předchozí kapitole, které by se více či méně na naměřených datech projevovaly.

Podkrovní byt v Kyžlířově již pocitově vykazoval lepší podmínky než v předchozích prostorách podkrovního bytu v Brně, a to nejen v řešeném prostoru pokoje. Tento fakt potvrdily i výsledky měření viz graf 16 a 17, kde byla pozornost věnována opět večerním hodinám vybraného jednoho dne (celkový průběh přílohy diplomové práce). Teplota v místnosti vykazovala daleko menší výkyvy během dne vlivem lepšího systému vytápění s regulací teploty pomocí termostatických ventilek instalovaných na každém otopném tělese.

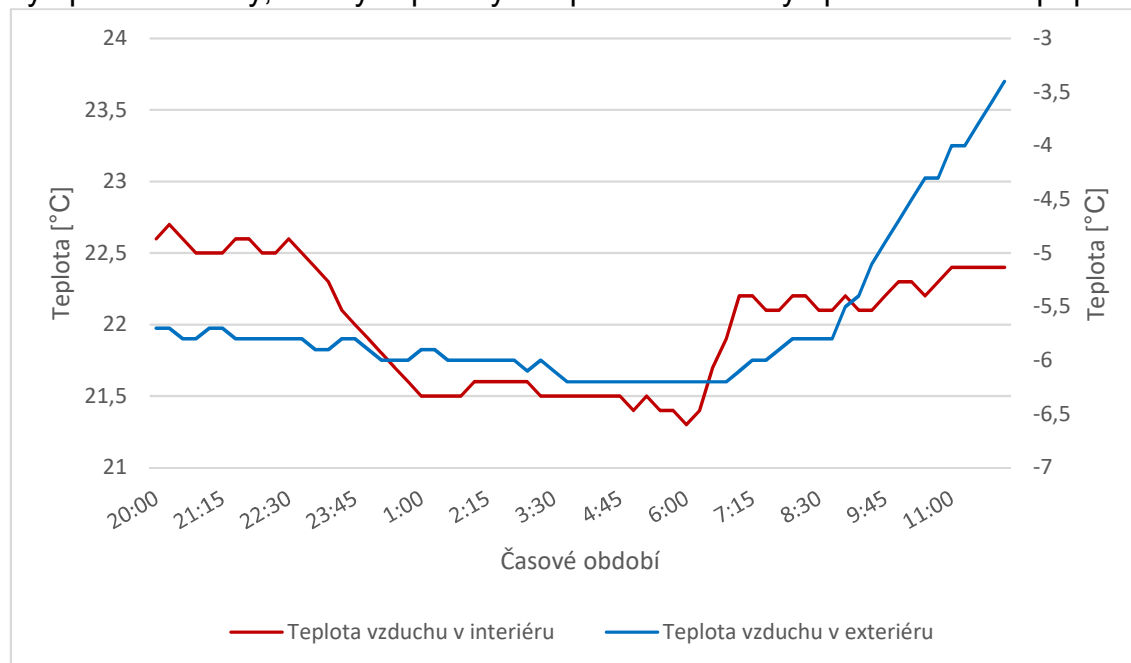


Graf 15 Průběh teploty vzduchu v pokoji a exteriéru v Kyžlířově

Vzhledem k dobře zvolenému měřítku můžeme pozorovat, jak se místnost ochlazuje po ukončení vytápění a následném zátoku. Teplota v místnosti klesne během devíti hodin cca o 1,5 °C při průměrné teplotě v exteriéru -3,0 °C.

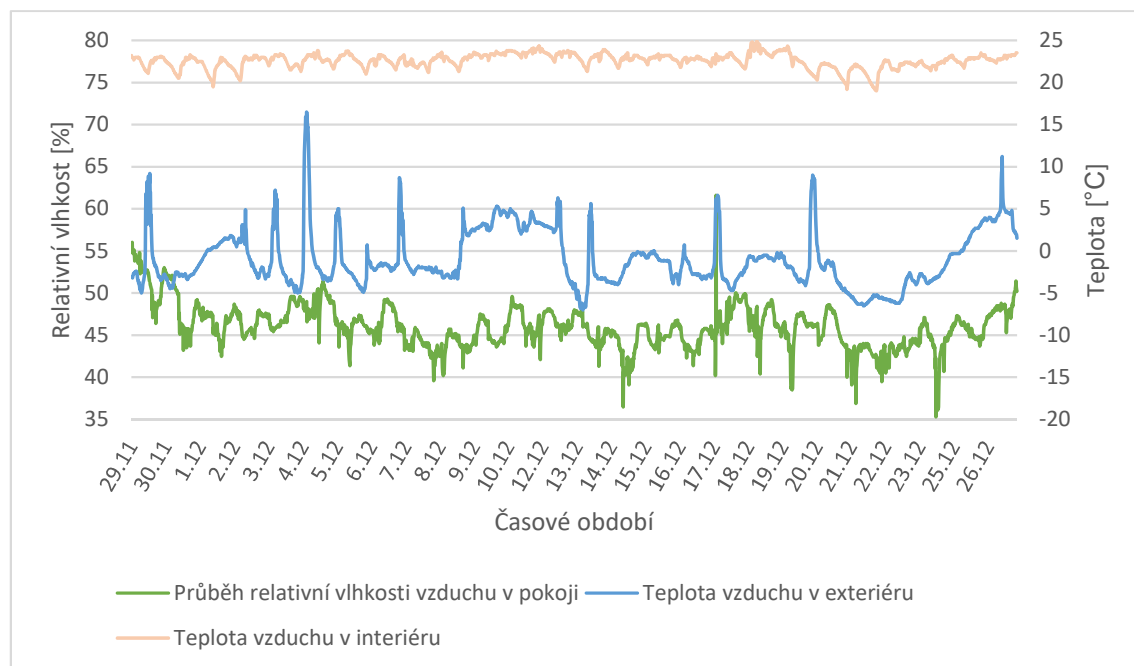
Pokud bychom se zaměřili na období, kdy teplota v exteriéru je zhruba dvounásobně nižší tj. -6 °C. Klesne teplota už za 7 hodin o 1 °C. Déle můžeme pozorovat daleko strmější pokles teploty, než tomu bylo v předchozím případě.

Norma ČSN 73 0540 definuje tepelnou stabilitu v zimním období pomocí poklesu výsledné teploty v kritických místnostech s pobytem lidí po přerušení vytápění radiátory, sálavými panely či teplovzdušným vytápěním. V tomhle případě



Graf 16 Průběh teploty vzduchu v pokoji a exteriéru v Kyžlířově

nesmí být pokles větší jak $3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Z toho vyplývá že na stabilitu místnosti pokoj v Kyžlířově bez problému vyhoví. Délka otopné přestávky je poloviční, než udává norma. Fakt že podkroví v druhém případě vykazuje pocitově daleko lepší podmínky, než podkroví v Brně můžeme potvrdit nejen nižšími výkyvy teploty v interiéru vlivem stabilnějšího druhu vytápění ale také závislostí této teploty na teplotě exteriérové. Kdy v případě prvního prostoru klesne teplota o $2,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ při průměrné teplotě v exteriéru $9,5\text{ }^{\circ}$ už za 7 hodin. To že v podkroví v Kyžlířově bude daleko méně docházet k výměně vzduchu vlivem infiltrace je patrné z grafu 18. Kde závislost venkovní teploty na relativní vlhkost v interiéru není tak výrazná.



Graf 18 Závislost relativní vlhkosti vzduchu v interiéru na teplotu vzduchu v exteriéru



Graf 17 Rozdíl parciálních tlaků interiéru a exteriéru během sledovaného období

Závěrečné zhodnocení výsledků měření

Optimální hodnoty tepelně vlhkostního stavu prostředí, jsou problém vůbec stanovit. Jednak stávající hygienické předpisy v podstatě vůbec nestanovují požadavky na kvalitu vnitřního prostředí interiérů obytných budov. Tak i přímo správná lépe řečeno striktní optimální hodnota těchto dvou fyzikálních veličin, aby vyhovovala všem lidem v podstatě nelze stanovit. Viz kapitola Optimální teplota a vlhkost.

V současné době se stavební praxe opírá o požadavky ČSN 73 0540-2, kde jsou parametry teploty stanoveny na 18-22 °C a relativní vlhkost na 50 % ±5 %.

Pokud bychom přece jenom chtěli optimální hodnotu tepelně vlhkostního stavu prostředí určitým způsobem lepe specifikovat mohli bychom si například pomoci nařízením vlády č.361/2007 Sb. Které stanovuje podmínky ochrany zdraví při práci.

V příloze č.1 k nařízení vlády č. 361/2007 Sb. v části A kde se pojednává o přípustných hodnotách a hodnocení zátěže teplem, bychom obytné prostory mohli zařadit do třídy práce I. To jsou práce s celkovým energetickým výdejem člověka do 80 W/m². Zde patří práce v sedě s minimální celotělovou pohybovou aktivitou, kancelářské a administrativní práce atd. Optimální požadavky na takovéto vnitřní prostředí jsou uvedeny v tabulce níže. [28]

Tabulka 9 Optimální požadavky na vnitřní prostředí [28]

Tepelně vlhkostní podmínky pro chladné období roku		
Operativní teplota t_o [C°]	Rychlost proudění vzduchu [m/s]	Relativní vlhkost rh [%]
20-25 (optimální 22±2)	0,1-0,2	30-70

Operativní teplota se v tomto případě vypočítá: [16]

$$t_o = t_r + A(t_a - t_r)$$

- t_r [C°] střední radiační teplota okolních ploch
- t_a [C°] teplota vzduchu
- A je funkcí rychlosti proudění vzduchu viz, tab. 6

Tabulka 10 Závislost koeficientu A pro výpočet operativní teploty t_o na rychlosti proudění vzduchu v_a [18]

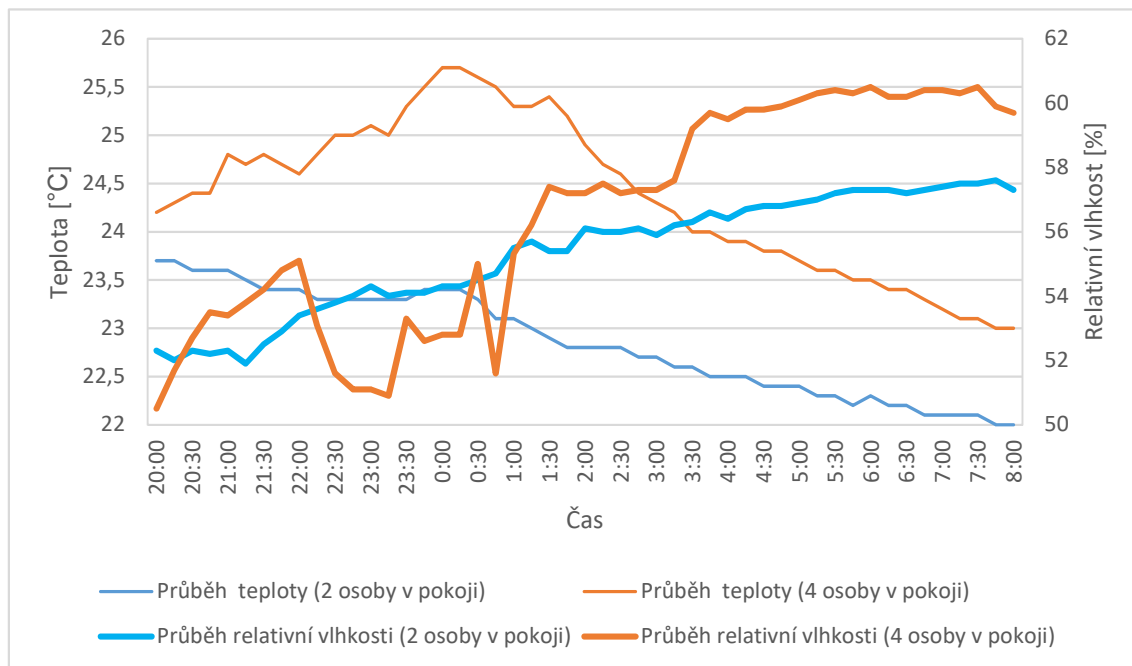
v_a [m/s]	0,2
A [-]	0,5

Co se týče tepelné stability tak tepelně technická norma ČSN 73 0540-2 v části 8 kde se hodnotí tepelná stabilita místnosti v letním období, uvádí maximální hodnotu $\theta_{ai,max,N}=27$ °C. Norma pamatuje i na zimní období, viz *Výsledky měření vnitřního mikroklimatu v podkrovním bytě v Kyžlířově*.

Nároky člověka na potřeby běžného života všeobecně rostou, výjimkou není ani teplota, na kterou pobytové místnosti vytápíme. Místo teploty 19–21 C°, která byla běžná v domech našich babiček a která se mimochodem uvažuje, jako výpočtová v tepelně technických výpočtech se reálně v dnešních domácnostech pohybuje okolo 22-25 C°. To mohou potvrdit i výsledky experimentálního měření vnitřního mikroklimatu dvou podkrovních bytů.

Pokud bychom se zaměřili na relativní vlhkost v zimním období budeme se v některých vytápěných prostorách, kde není možné vzduch uměle zvlhčovat potýkat s velmi nízkou relativní vlhkostí, některých případech až pod úroveň 20 %. I v zimním období jde tento problém řešit větráním, avšak pouhým větráním při velkých mrazech si moc nepomůžeme, protože obsah vlhkosti ve vzduchu je velice nízký, vlhkost je „vymrzlá“. [35]

V případě že by se v bytě o malé podlahové ploše a kubatuře vzduchu vyskytovalo více osob, nejen že se při nedostatečném větrání rapidně zvýší koncentrace CO₂ tak i teplota a relativní vlhkost budou na tuto změnu reagovat, viz *graf 19*. Tenhle případ nám demonstruje již zmiňovaný prostor malého



Graf 19 Průběh teplot a relativních vlhkostí vzduchu při běžné a dvounásobné obsazenosti osob v pokoji

podkrovního pokoje podléhajícího experimentálnímu měření mikroklimatu vnitřních prostor. Z grafu 19 je patrné, jak se změnila teplota a reaktivní vlhkost při dvounásobném množství osob v prostoru oproti normální obsazenosti.

Nesplnění některých podmínek, které jsou dány na kvalitu vnitřního prostředí, vede k použití termínu, který je vzhledem k klesající energetické náročnosti budov a tím i k takřka hermetickým oddělením vnitřního a vnějšího prostředí, čím dál tím používanější tzv. „Syndrom nemocných budov“ (SBS-Sick building syndrome). Ten byl v roce 1982 zaveden do medicínské terminologie. Typickými příznaky jsou zdravotní potíže bez zjevných příčin, pouze když pobývají uvnitř nemocných budov. Příznaky rozdělujeme do čtyř základních skupin:

- Postižení očí a horních cest dýchacích, pocity dráždění a pálení očí, nosu, nosohltanu, rýma.
- Postižení dolních cest dýchacích, tlak na prsou, dušnost, někdy až astmatického rázu, pocit závratě, nevolnost.
- Kožní dráždění, svědění, zčervenání pokožky, vyrážka.
- Potíže centrálně nervové jako bolesti hlavy, letargie, vznětlivost, snížení pracovní kapacity a paměti, poruchy spánku, nesoustředěnost, únava. [16]

I když nejsou dány závazné požadavky na jednotlivé faktory charakterizující kvalitu vnitřního prostředí obytných místností, existuje řada ověřených doporučení, které v praxi fungují, viz kapitola 5.2. Tyto doporučení by se měly mít při nejlepším na paměti a nejlépe se jimi opravdu řídit a respektovat je, protože není snad nic důležitějšího, než abychom se ve svém obytném prostředí cítily dobře a negativně nás neovlivňovalo po zdravotní stránce.

13 Numerická analýza tepelně vlhkostní procesů v konstrukcích

Následující část diplomové práce specifikuje skladby, které budou dále podrobeny výpočtům v tepelně technických softwarech. Výběr typů skladeb obvodových konstrukcí stěn byl zaměřen tak, aby pokryl co největší spektrum nejpoužívanějších materiálů. Jelikož nejdůležitějším faktorem, který ovlivňuje životnost dřevostaveb je vlhkost, byly vybráni zástupci jak difúzně otevřených konstrukcí, tak difúzně uzavřených konstrukcí. Prvkem, který nejvíce ovlivňuje množství difundujících par v konstrukci jsou deskové či foliové materiály s funkcí parozábrany či parobrzdy. I z tohoto hlediska bylo pamatováno na různorodost ve výběru posuzovaných konstrukcí.

Dále bude uveden popis principu, na jakém pracují software pro tepelně technické posouzení vybraných konstrukcí, jmenovitě program Teplo, Wufi 5 a Wufi Bio a následná analýza konstrukcí v těchto programech.

13.1 Metodika pro naplnění dílčího cíle

Specifikace vybraných skladeb obvodových stěn dřevostaveb

Vybrané skladby obvodových stěn:

- a) Difúzně uzavřené obvodové stěny
 - RD Rýmařov
 - American House Styles
- b) Difúzně otevřené obvodové stěny:
 - RD Rýmařov
 - Insowool – Diffuwall 2010

Dále pro zjednodušení bude zavedeno označení jednotlivých konstrukcí takto:

- Difúzně otevřená skladba RD Rýmařov => **DO Rýmařov**
- Difúzně uzavřená skladba RD Rýmařov => **DU Rýmařov**
- Difúzně otevřená skladba Insowool Diffuwall Economy plus => **DO Diffuwall**
- Difúzně uzavřená American house styles => **DU American**

Dřevostavby RD Rýmařov

Společnost RD Rýmařov s.r.o. působí na trhu již 47 let. Výroba probíhá ve výrobních halách v Rýmařově, kde se za pomoci moderní automatické linky připravují obvodové stěny, stropy, příčky a všechny ostatní komponenty. Na stavbu se přiváží kompletně hotové konstrukční prvky. Takže se jedná o systém plně prefabrikovaný. Z toho důvodu je stavba, včetně všech řemeslných prací nejpozději do jednoho měsíce hotová. [36]

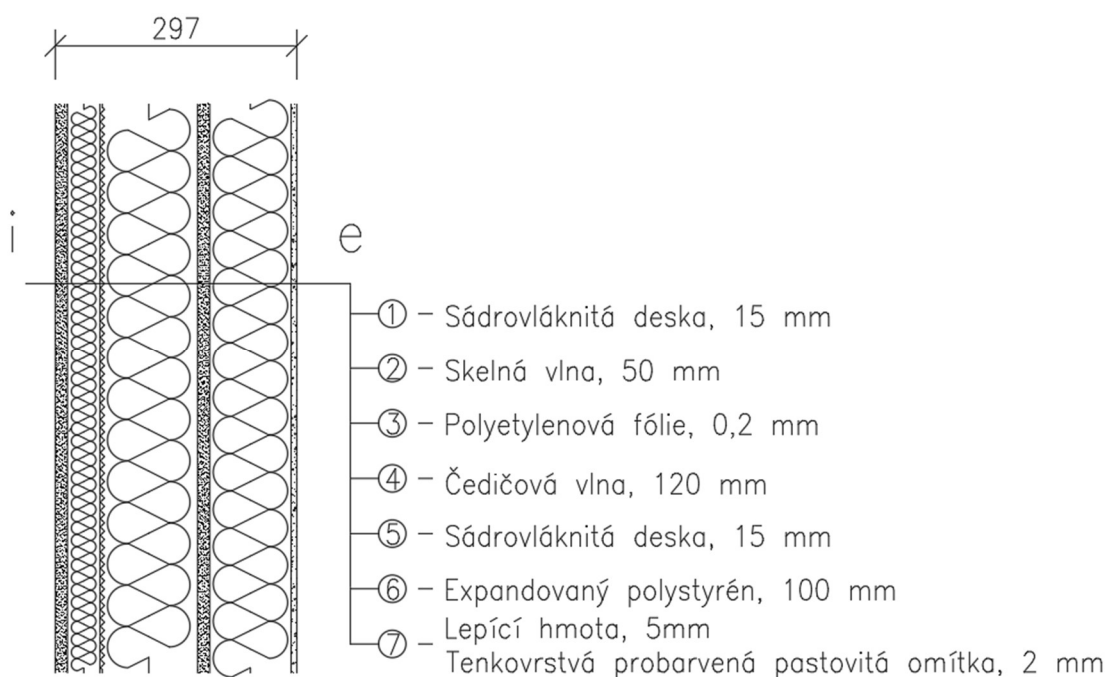
a) DU Rýmařov


Schéma 18 Skladba stěny DU Rýmařov

Tabulka 11 Skladba stěny DU Rýmařov

OZN	FUNKCE	POUŽITÝ MATERIÁL	T l .	μ	λ	Obchodní název
			[mm]	[-]	[W/mK]	
1	pohledová	Sádroláknitá deska	15	1 3	0,32	Fermacel
2	Tepelně izolační	Skelná vlna	50	1	0,039	Isover Domo
3	Parozábrana	Polyetylenová fólie	0,2	500000	-	Homeseal LDS 100
4	Tepelně izolační	Čedičová vlna	120	1	0,035	Isover Uni
5	Podkladní	Sádroláknitá deska	15	13	0,32	Fermacell
6	Tepelně izolační	Expandovaný polystyrén	100	30	0,032	Isover EPS GreyWall
7.1	podkladní	Lepicí hmota	5	14		Weber.therm clima
7.2	pohledová	Tenkovrstvá probarvená Pastovitá omítka	2	-	0,8	Weber.pas extraClaen

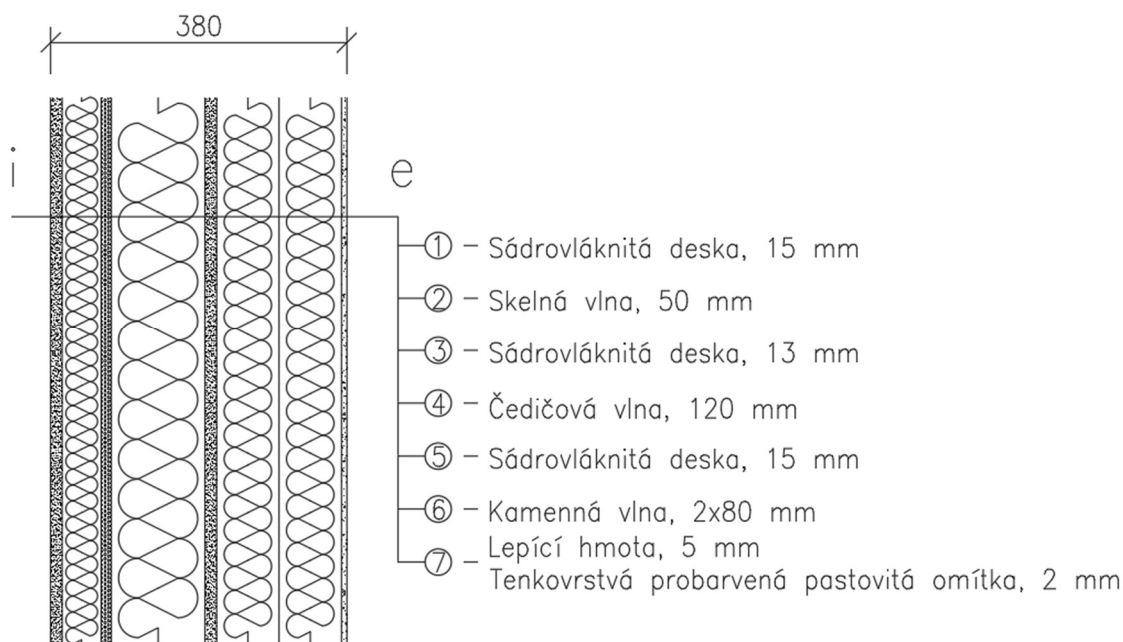
b) DO Rýmařov


Schéma 19 Skladba stěny DO Rýmařov

Tabulka 12 DO Rýmařov

OZN	FUNKCE	POUŽITÝ MATERIÁL	TI.	μ	λ	Obchodní název
			[mm]	[-]	[W/mK]	
1	pohledová	Sádroláknitá deska	15	13	0,32	Fermacel
2	Tepelně izolační	Skelná vlna	50	1	0,039	Isover Domo
3	parobrzdná	Sádroláknitá deska	13	240	0,32	Fermacell Vapor
4	Tepelně izolační	Čedičová vlna	120	1	0,035	Isover Uni
5	Podkladní	Sádroláknitá deska	15	13	0,32	Fermacell
6	Tepelně izolační	Kamenná vlna	2x80	1	0,036	Rockwool FrontRock MAX E
7.1	podkladní	Lepicí hmota	5	14		Weber.therm clima
7.2	pohledová	Tenkovrstvá probarvená pastovitá omítka	2	-	0,8	Weber.pas extraClaen

Dřevostavby Insowool

Společnost Insowool se zabývá návrhem tzv. ekologických dřevostaveb. Ekologických proto, protože se systematicky zaměřuje zejména na problematiku využití přírodních materiálů pro konstrukce dřevostaveb, aby přispívaly ke zdravému prostředí v jejich interiérech, byly energeticky úsporné, a přitom vytvářely příjemnou pohodu v interiérech nejen v zimním, ale i v letním období. Společnost také jako první na trhu v ČR zavedla na trh tzv. difúzně otevřené konstrukce.

Výrobce návrhem takových to konstrukcí reaguje na problematiku nevyhovujícího tepelně vlhkostního mikroklimatu v budovách, kdy jsou konstrukce navrženy s úplnou absencí jakékoliv parozábrany, díky tomu by mělo být vlhkostní mikroklima stabilnější. Investor má v tomhle případě při zvolení si obvodového pláště s výplňovou minerální izolací Difuwall 2010 na výběr ze tří energetických variant kde si volí míru tepelné izolačních schopností tak i zároveň odolnost proti přehřívání. [37]

Tabulka 13 Varianty skladby stěny Difuwall 2010

Difuwall 2010 varianta	Tloušťka stěny	U	ψ
	[m]	[W/m ² K]	hodina
Economy	0,3	0,17	8,9
Economy plus	0,34	0,14	12
Pasiv	0,42	0,11	12,8

Jednotlivé varianty se liší pouze tloušťkou tepelné izolace mezi sloupky u verze Economy je to 160 mm a u Pasivu 240 mm. Stejný rozdíl je v tloušťce tepelné izolace na exteriérové straně, ve variantě Economy 60 mm a u skladby Economy plus a Pasiv je to 100 mm. [37]

Difúzně otevřený obvodový plášť Difuwall 2010

Vlastnosti charakterizující skladbu:

- Úplná absence parozábrany
- Umožňuje průchod vodní páry difúzí
- Je plně ekologický
- Má schopnost regenerace při nadměrném navlhnutí
- Je nepropustný pro vodu jako kapalinu

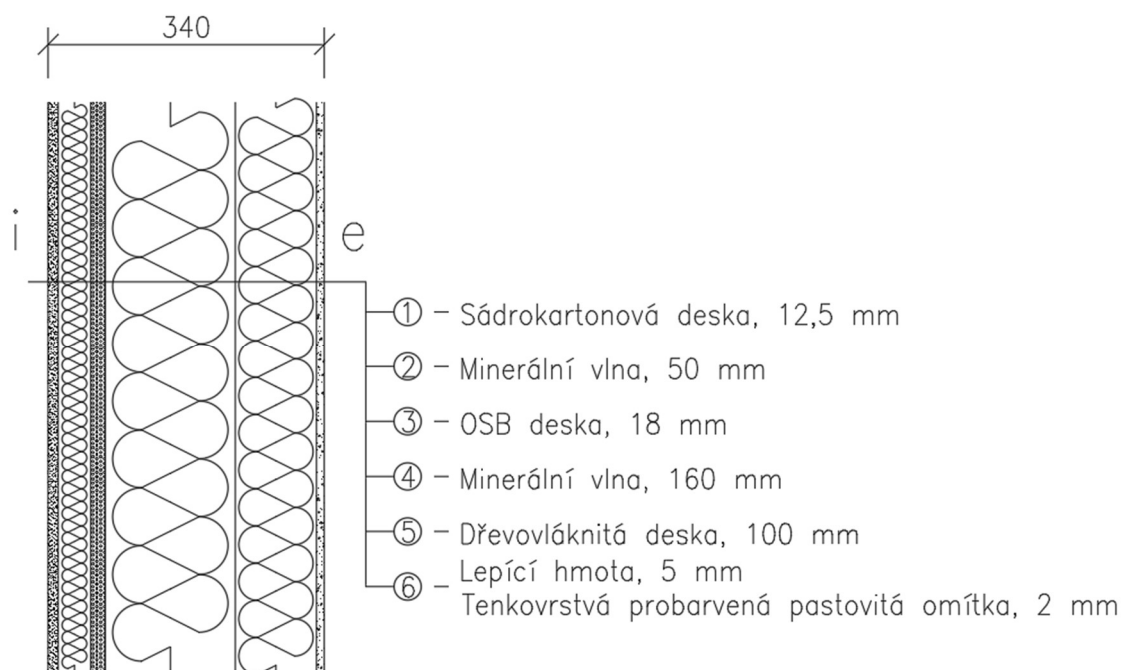


Schéma 20 Skladba stěny DO Diffuwall

Tabulka 14 Skladba stěny DO Diffuwall

OZN	FUNKCE	POUŽITÝ MATERIÁL	TL. [mm]	μ [-]	λ [w/mK]	OBCHODNÍ NÁZEV
1	pohledová	Sádrukartonová deska	12,5	10	0,25	Knauf white
2	Instalační	Dřevěný rošt vyplněný minerální vlnou	50	1	0,033	Knauf insulation Naturoll 033
3	parobrzdná	OSB deska	18	150	0,1	OSB AIRSTOP Kronospan
4	Tepelně izolační	Minerální vlna	160	1	0,033	Knauf insulation Naturoll 033
5	Tepelně izolační	Dřevovláknitá deska	100	5	0,043	Pavatex Diffitherm
6.1	podkladní	Lepicí hmota	5	14		Weber therm clima
6.2	pohledová	Tenkovrstvá probarvená omítka	2		0,8	Weber pas extraClean

Dřevostavby American House Styles s.r.o.

Společnost se zabývá výstavbou nízkoenergetických a pasivních dřevostaveb rodinných domů sendvičového typu. Výstavba probíhá přímo na staveništi bez jakéhokoli stupně prefabrikace. Pýchou společnosti je dlouholetá zkušenost s výstavbou dřevostaveb z USA a momentálně i České republiky. [38]

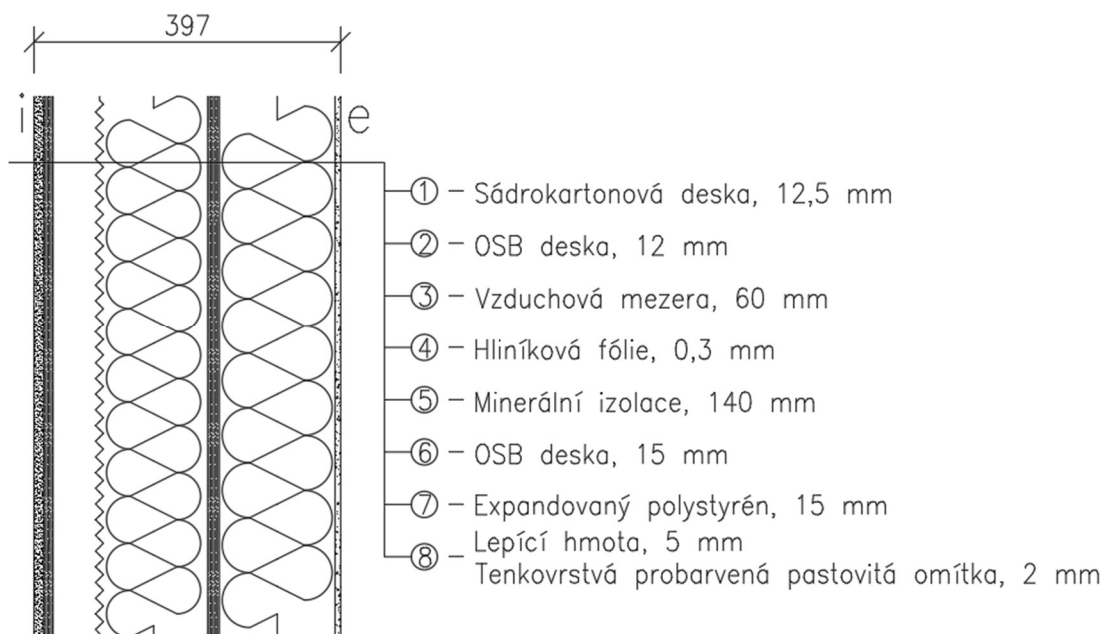


Schéma 21 Skladba stěny DU American

Tabulka 15 Skladba stěny DU American

OZN	FUNKCE	POUŽITÝ MATERIÁL	TL. [mm]	μ [-]	λ [W/mK]	OBCHODNÍ NÁZEV
1	Pohledová	Sádrokartonová deska	12,5	6	0,21	Rigips
2	Podkladní	OSB deska	12	150	0,1	OSB 3 Kronospan
3	Instalační předstěna	Vzduchová mezera	60	-	-	-
4	Parozábrana	Polyolefinová fólie	0,3	$1,6 \times 10^6$	-	Jutafol N 170 AL
5	Tepelně izolační	Minerální izolace	140	1	0,035	Isover UNI
6	Podkladní	OSB deska	15	150	0,1	OSB 3 Kronospan
7	Tepelně izolační	Expandovaný polystyrén	150	30	0,032	Isover GreyWall
8.1	podkladní	Lepící hmota	5	14		Weber therm clima
8.2	pohledová	Tenkovrstvá probarvená omítka	2		0,8	Weber pas extraClean

Metodika posuzování konstrukcí

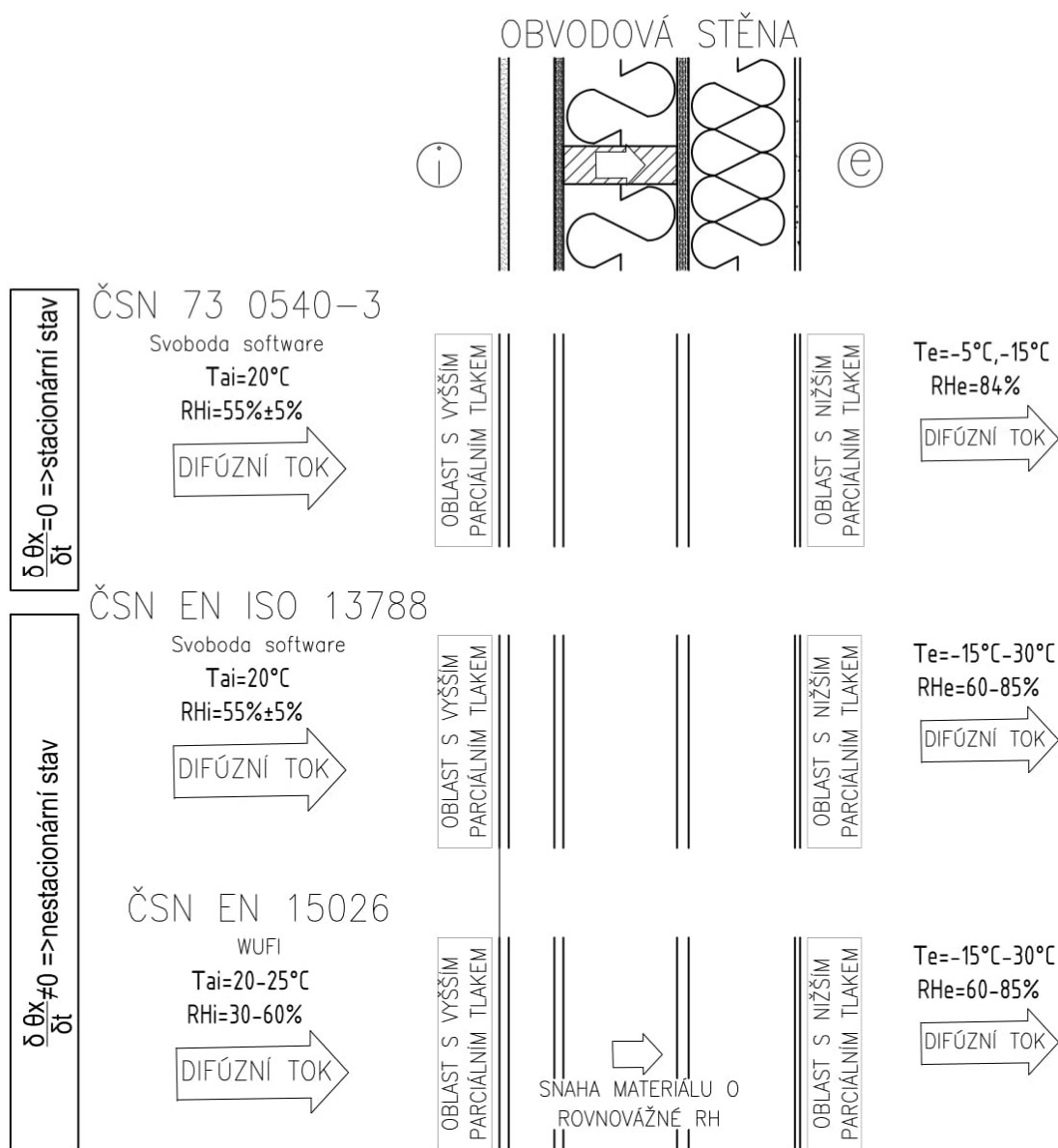


Schéma 22 Metodika posuzování konstrukcí z pohledu českých technických norem

Program Teplo

Teplo, v tomto případě byla pro výpočet použita verze Teplo 2014, je program, který je určen pro základní tepelně technické posouzení skladeb konstrukcí z hlediska prostupu vodní páry a tepla ve stacionárním stavu. Umožňuje výpočet tepelného odporu a součinitele prostupu tepla, vnitřní povrchové teploty, poklesu dotykové teploty podlahové konstrukce, rozložení teplot a tlaků vodní páry v konstrukci, oblasti kondenzace a roční bilance zkondenzované vodní páry. Využívá požadavků ČSN 730540-2 a postupy ČSN 730540-4. EN ISO 6946 a EN ISO 13788. [24] Více o postupech výpočtu dle českých norem pojednává kapitola 2.1 *Tepelně vlhkostní zátěž konstrukcí obecně*.

Ze všech informací o vhodnosti použití či nepoužití výpočtů popsaných dle současných českých technických norem a porovnání s nejnovějšími poznatky ze světa stavební fyziky, by se dalo hovořit jakémsi zjednodušení které neodpovídají současným poznatkům. [10]

Tak jako se dále rozvíjí stavební materiály tak se rozvíjí i výpočtové metody. Jednodušší výpočtové metody mají však i své výhody, a to například v jednodušších postupech které dávají rychlé a jednoznačné výsledky které jsou zatíženy menším rizikem vnesených chyb, případně chyby jsou snadno odhalitelné. [10]

Stejně jako výhodou byla jednoduchost může být v určitých případech i značnou nevýhodou, a to zejména v případě modelování obtížnějších konstrukčních uspořádání či složitějších okrajových podmínek kdy nemohou tyto postupy někdy dostatečně postihnout vzájemné souvislosti.

Program WUFI 5

Výpočetní model programu Wufi (Wärme Und Feuchte Instationar – teplo a vlhkost nestacionárně) vznikl na základě dizertační práce H.M. Künzela a jeho soustavy diferenciálních rovnic.

Soustava diferenciálních rovnic je unikátní tím, že jednotlivé rovnice jsou vzájemně svázány, to znamená že částečný tlak vodních pár závisí na okamžité teplotě napříč konstrukcí, součinitel tepelné vodivosti závisí na aktuální vlhkosti v materiálu a skupenské teplo závisí na množství vlhkosti vyskytující se napříč konstrukcí.

Hlavní výhody použití softwaru Wufi oproti stacionárním normovým výpočetním postupům:

- Umožňuje dynamicky simulovat šíření tepla a vlhkosti ve stavebních konstrukcích s libovolným časovým krokem
- Natočit konstrukci vůči světovým stranám i vůči horizontální rovině
- Zahrnout vliv slunečního záření a dlouhovlnného záření na šíření tepla a vlhkosti
- Uvažovat s akumulací tepla a vlhkosti v jednotlivých vrstvách konstrukce
- Vztít v úvahu závislost součinitele tepelné vodivosti materiálu na množství vlhkosti materiálu
- Vztít v úvahu závislost faktoru difúzního odporu na množství vlhkosti v materiálu
- Uvažovat se šířením kapalně vlhkosti v porézním materiálu
- Zahrnout absorpci hnaného deště na vnější povrch stavební konstrukce

Další možnosti, co lze v programu Wufi modelovat je simulování nejrůznějších tepelně vlhkostních dějů:

- Čas potřebný k vysušení vlhké konstrukce
- Riziko nadměrné akumulace vlhkosti uvnitř stavební konstrukce
- Chování konstrukce při zatékání dešťové vody
- Riziko růstu plísní na povrchu konstrukcí

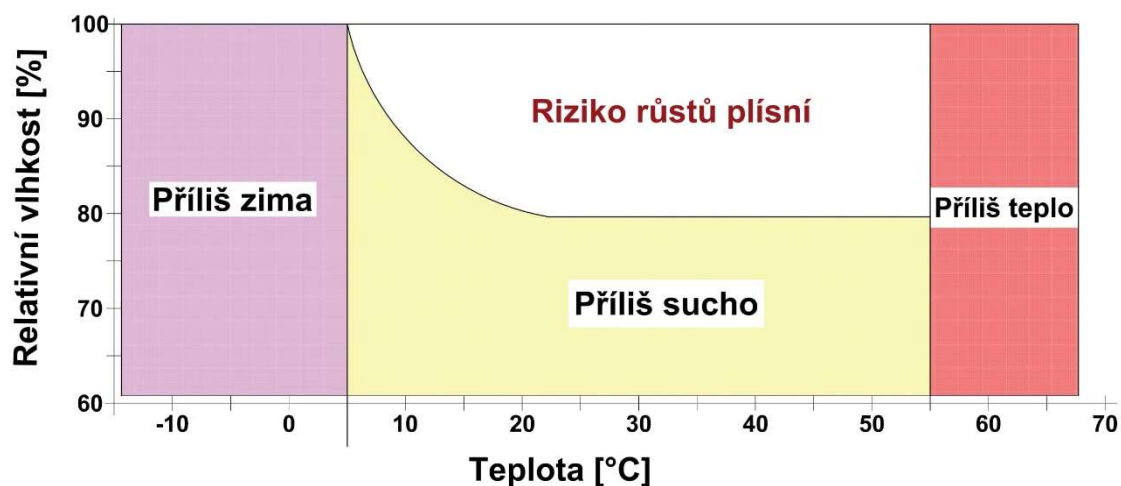
Použití software Wufi české technické normy umožňují. Píše o tom článek 6.3 normy ČSN 730540-2, který připouští použití pokročilejších výpočtových metod podle ČSN EN 15026. Wufi požadavky normy ČSN EN 15026 na simulační software umožňující dynamické simulace šíření vlhkosti a tepla stavebních konstrukcí splňuje.

V každé konstrukci bude vyhodnocováno celkové množství vody napříč konstrukcí a průběh relativní vlhkosti v jednotlivých monitorovacích bodech.

Klimatická data v databázi softwaru jsou pro Českou republiku, město Hradec Králové.

WUFI-Bio

Nevhodnou kombinací teploty, relativní vlhkosti a doby expozice mohou vznikat rizika pro růst plísní. Plíseň je výsledkem biologických procesů, kde



Ilustrace 18 Závislost relativní vlhkosti na teplotě vzhledem k riziku růstů plísní

dochází k shromažďování mikroskopických organismů. Kromě estetických a hygienických problémů které jsou spojovány právě s výskytem plísní na povrchu konstrukcí, je zde i riziko ohrožení zdraví osob vyskytující se právě v tomto prostředí díky škodlivým látkám, které plísně produkují.

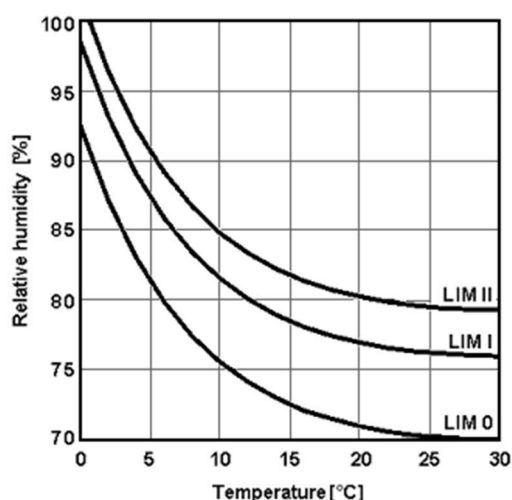
Program Wufi-Bio slouží k analyzování rizika růstů plísní díky procesu, který v hodinových intervalech hodnotí tepelně vlhkostní podmínky na povrchu konstrukcí a porovnává je s podmínkami vhodnými pro růst plísní (Bio hydrotermální model) v kombinaci s modelem který hodnotí tempo růstu plísní (Viitanen model) pomocí tzv. plísňového indexu.

Tabulka 16 Plísňový index (Viitanen model)

Plísňový index	
0.	Žádný růst
1.	Růst viditelný pouze mikroskopem
2.	Mírný růst viditelný mikroskopem, pokrytí více než 10 %
3.	Některý růst už viditelný vizuálně
4.	Vizuální pokrytí více než 10 %
5.	Vizuální pokrytí více než 50 %
6.	Pokrytí těsně pod 100 %

Tento výpočetní model lze použít pouze pro vnitřní povrchy. Na venkovních plochách, zejména kvůli faktorům jako je zvýšená vlhkost zapříčiněná dešťovými srážkami atd. by vyhodnocení naznačovalo zvýšené riziko růstu plísní. Ve skutečnosti jsou zde faktory, které metoda vůbec nezohledňuje, jsou to právě ty, které brání růstu plísní (sluneční záření, dezinfekce pomocí UV záření, omývání deštěm atd.)

Konstrukce, která podléhá analýze je zatříděna dle druhu povrchu:

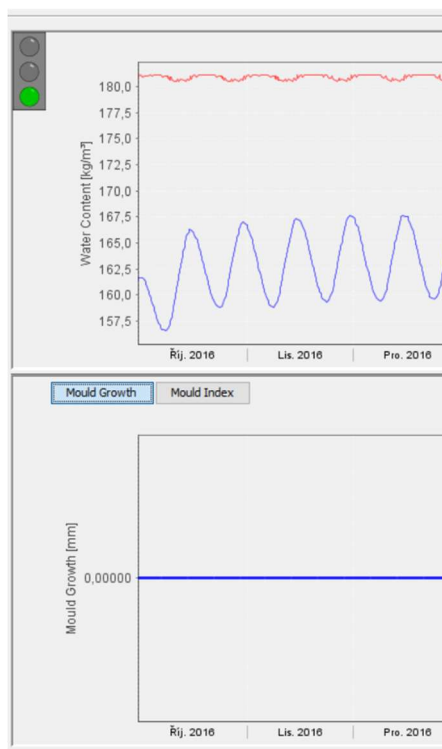


Ilustrace 19 Limitní hodnoty teploty a relativní vlhkosti pro jednotlivé druhy povrchů vzhledem k riziku růstu plísní

0. Optimální povrch pro růst plísní

1. Povrchy, respektive materiály s biologicky rozložitelných materiálů, materiál trvale pružný
2. Biologicky nerozložitelné povrchy s porézní strukturou jako jsou omítky, minerální stavební materiály, určité druhy dřeva, izolační materiály nepatřící do skupiny jedna

Část závěrečného hodnocení výstupu z programu Wufi Bio je zobrazena na ilustraci 20. Horní graf znázorňuje množství vody v kg/m^3 určitého materiálu



Ilustrace 20 Výsledky hodnocení povrchu v software Wufi Bio

(modrá křivka). Hraničním ukazatelem pro rizika růstů plísní je červená křivka kritického obsahu vody. Posouzení konstrukce probíhá pomocí barevné stupnice viz ilustrace 20 levý horní roh a to takto:

1. Nezobrazí se žádný světelný signál
 - není možné posouzení
2. Červený signál
 - růst přesáhne 200 mm/rok, obvykle nepřijatelné
3. Žlutý signál
 - růst v rozmezí 50-200 mm/rok, zde je zapotřebí další vyšetření konstrukce pro posouzení přijatelnosti vzhledem k dalším kritériím
4. Zelený signál
 - růst plísní je nižší než 50 mm/rok, obvykle se považuje za přijatelný

13.2 Dílčí výsledky numerické analýzy tepelně vlhkostních procesů ve vybraných konstrukcích

Roční bilance zkondenzované a vypařené vodní páry dle ČSN 730540-2 a EN ISO 13 788 (Svoboda software-Teplo2014)

V této části práce budou graficky znázorněny výstupy z programu Teplo 2014. Vyhodnocení bude vždy dvojí, a to dle ČSN 730540-2 a EN ISO 13 788.

Okrajové podmínky:

Tabulka 17 Neměnné okrajové podmínky ve výpočtech

Název/označení	Hodnota [-]
Tepelný odpor při přestupu tepla v interiéru R_{si}	0.13 m ² K/W
Tepelný odpor při přestupu tepla v exteriéru R_{se}	0.04 m ² K/W
Návrhová teplota vnitřního vzduchu T_{ai}	20.0 °C
Návrhová relativní vlhkost venkovního vzduchu RH_e	84.0 %
Návrhová relativní vlhkost vnitřního vzduchu RH_i	55.0 %

Měnit se bude postupně pouze návrhová venkovní teplota a třída vnitřní vlhkosti.

Tabulka 18 Měnicí se okrajové podmínky ve výpočtu

Název/označení	Hodnota [-]
Návrhová venkovní teplota T_e	-5,0 °C, -15 °C
Třída vnitřní vlhkosti	2.třída (nízká vlhkost, byty s normální obsazeností) 3.třída (střední vlhkost, budovy s neznámou obsazeností)

Varianta 1**Okrajové podmínky:**

Tabulka 19 Okrajové podmínky varianty 1

Název/označení	Hodnota [-]
Návrhová venkovní teplota T_e	-5,0 °C
Třída vnitřní vlhkosti	2.třída (nízká vlhkost, byty s normální obsazeností)

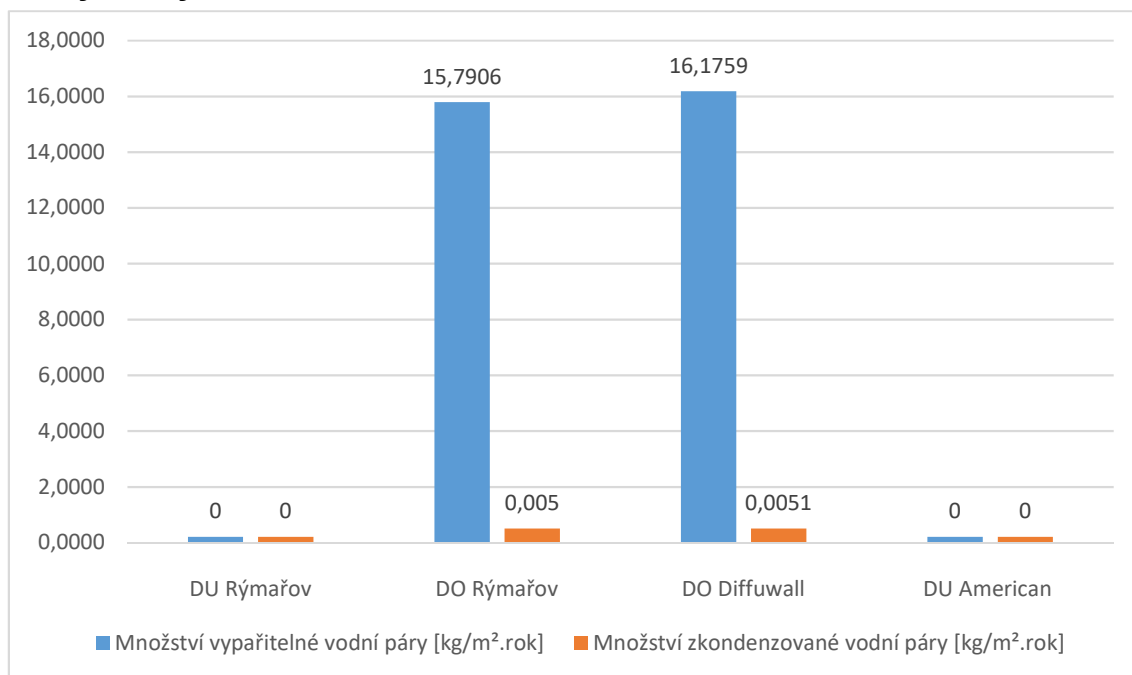
Výsledky:

- Při hodnocení roční bilance zkondenzované a vypařené vodní páry dle ČSN 730540-2 a EN ISO 13 788 nedochází během modelového roku ke kondenzaci vodní páry v konstrukci.

Varianta 2**Okrajové podmínky:**

Tabulka 20 Okrajové podmínky varianty 2

Název/označení	Hodnota [-]
Návrhová venkovní teplota T_e	-15 °C
Třída vnitřní vlhkosti	2.třída (nízká vlhkost, byty s normální obsazeností)

Výsledky:

Graf 20 Roční bilance zkondenzované a vypařené vodní páry dle ČSN 730540-2

- Dle EN ISO 13 788 ani v jedné konstrukci nedochází během modelového roku ke kondenzaci vodní páry

Varianta 3**Okrajové podmínky:**

Tabulka 21 Okrajové podmínky varianty 3

Název/označení	Hodnota [-]
Návrhová venkovní teplota T_e	-5,0 °C
	3.třída (střední vlhkost, budovy s neznámou obsazeností)

Výsledky:

- Při hodnocení roční bilance zkondenzované a vypařené vodní páry dle ČSN 730540-2 a EN ISO 13 788 během modelového roku nedochází ke kondenzaci vodní páry v konstrukci

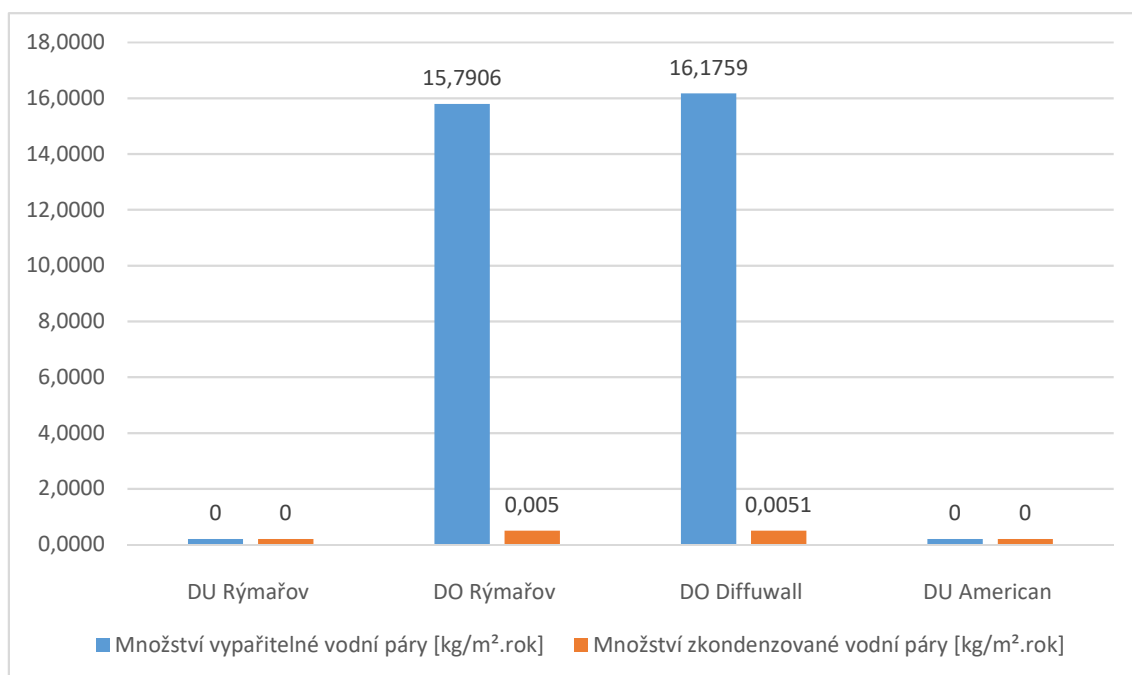
Varianta 4**Okrajové podmínky:**

Tabulka 22 Okrajové podmínky varianta 4

Název/označení	Hodnota [-]
Návrhová venkovní teplota T_e	-15 °C
Třída vnitřní vlhkosti	3.třída (střední vlhkost, budovy s neznámou obsazeností)

Výsledky:

- Dle ČSN 73 0540-2



Graf 21 Roční bilance zkondenzované a vypařené vodní páry dle ČSN 730540-2

- Dle EN ISO 13 788 ani v jedné konstrukci nedochází během modelového roku ke kondenzaci vodní páry

Celkové množství vody v konstrukci a průběh relativní vlhkosti v jednotlivých monitorovacích bodech (WUFI 5)

Okrajové podmínky:

Tabulka 23 Okrajové podmínky WUFI 5

Oblast	Název/označení	Hodnota [-]
Exteriér	Venkovní klima Sklon konstrukce Orientace ke SV	Pro oblast Hradce Králové 90 ° Sever
Počáteční relativní vlhkost 80 % napříč celou konstrukcí		
Interiér	Vnitřní klima dle EN 15026 Běžné zatížení vlhkostí	

Konstrukce obvodové stěny DU Rýmařov

Umístění monitorovacích bodů

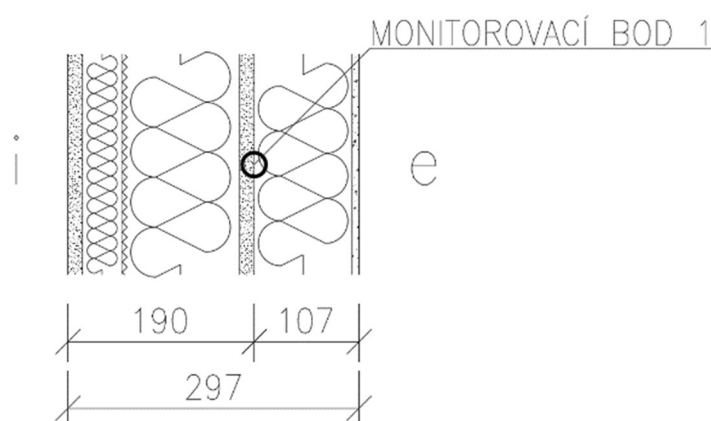


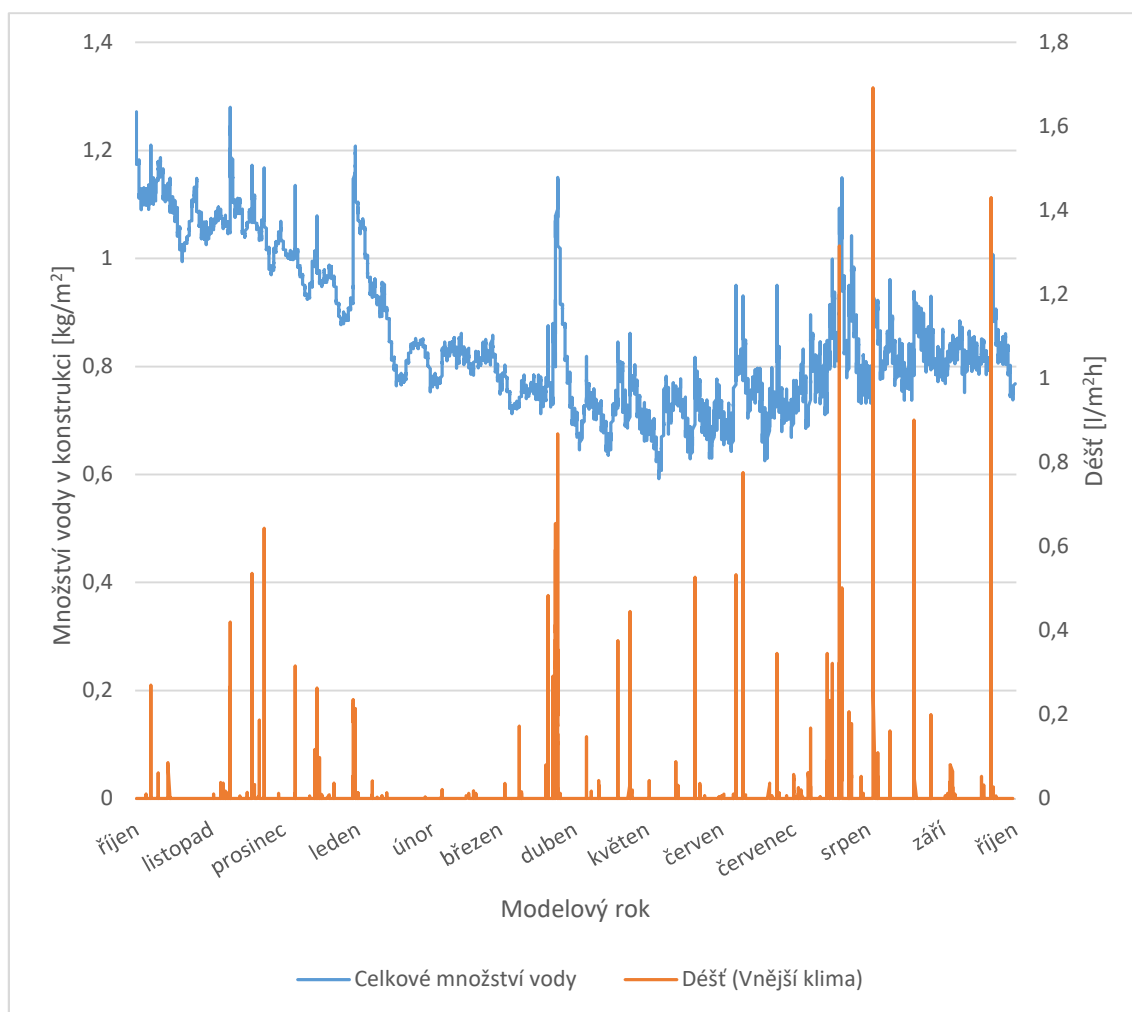
Schéma 23 Umístění monitorovacích bodů v konstrukci

Výsledky numerické analýzy

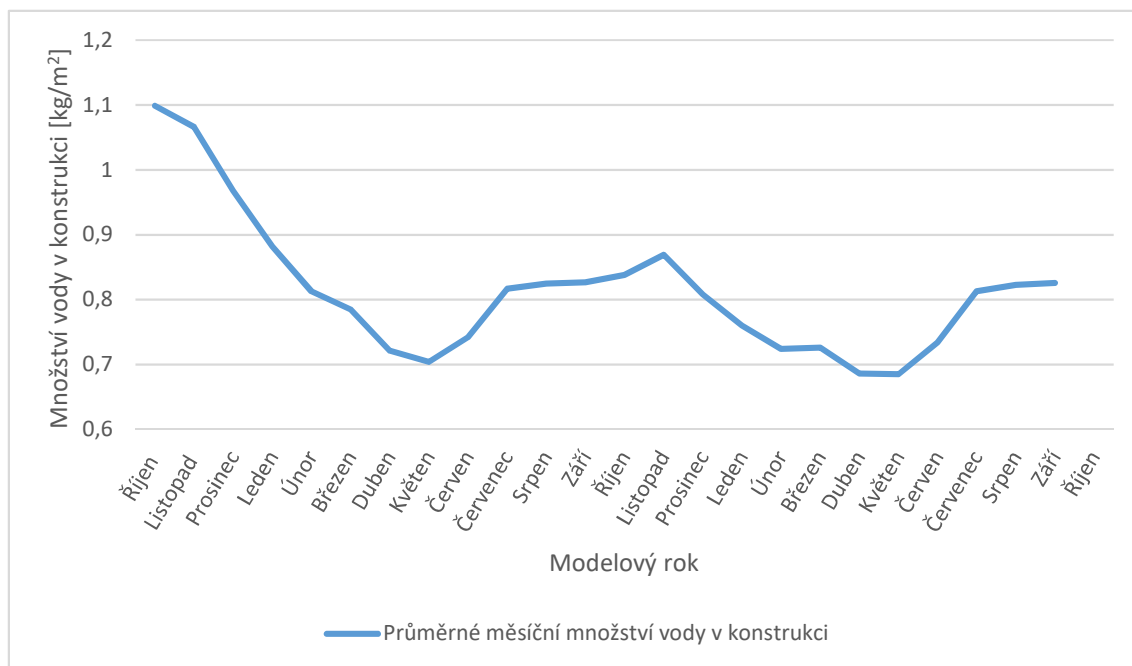
Celkový obsah vody nám zobrazuje, jak se konstrukce chová během sledovaného období. Standardně zde můžeme vidět, zda dochází k akumulaci vlhkosti v konstrukci či nikoli. Popřípadě zda akumulovaná vlhkost vysychá.

Možnosti je i zadání přímo naakumulované vlhkosti a sledovat dobu vysychání konstrukce např. při rekonstrukcích atd. S vysokým obsahem vody v konstrukci roste i riziko růstů plísní.

Pokud se během sledovaného období neustále množství vody zvyšuje není z konstrukcí něco v pořádku a musí se podrobit další analýze. Pokud se však naopak snižuje obsah vody v konstrukci oproti zadané počáteční vlhkosti až do ustáleného dynamického stavu, tj. kdy obsah vlhkosti zůstává konstantní, poté se dá konstrukce vyhodnotit z tohoto pohledu jako dobře fungující. Opakuje se



Graf 22 Celkové množství vody a vliv hnaného deště v konstrukci DU Rýmařov
pouze oscilace kolem hodnoty ustáleného stavu v důsledku sezonních změn klimatu, viz graf 22.



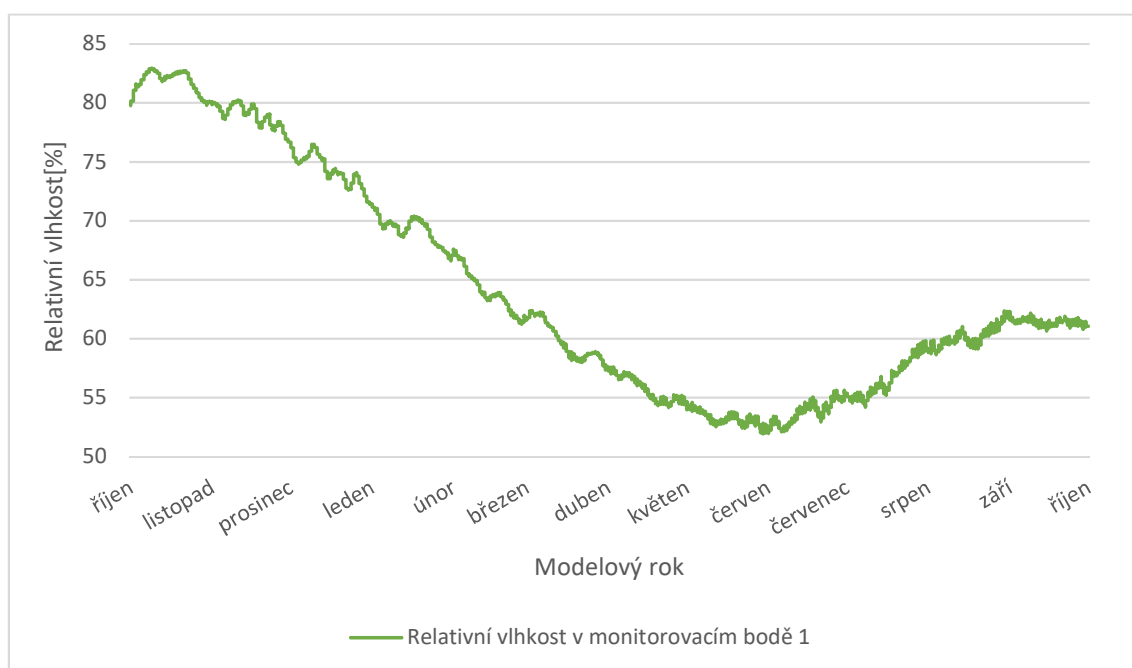
Graf 23 Průměrné množství vody v konstrukci DU Rýmařov během modelových dvou let

Prvopočáteční vyšší hodnota množství vody v konstrukci má za následek právě zadanou počáteční vlhkost, z grafu je však patrné že se množství vody klesá a po ustálení se průběh periodicky opakuje i další modelový rok.

Množství vody tedy nepřibývá takže by se dala tato konstrukce vyhodnotit jako vyhovující.

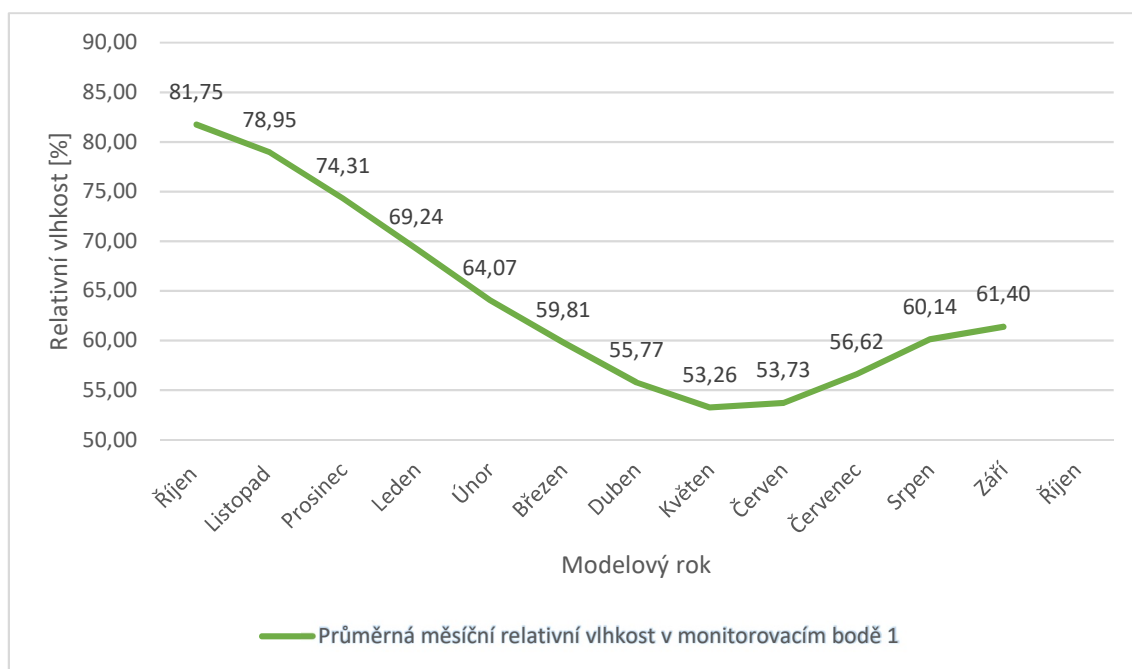
Jelikož všechny hodnocené konstrukce z hlediska množství vody v konstrukci vykazovaly podobné hodnoty budou rozebrány pouze v závěrečném hodnocení všech konstrukcí. Podrobnější grafický výstup jednotlivých konstrukcí je součástí příloh diplomové práce.

Průběh relativní vlhkosti v monitorovacím bodě 1



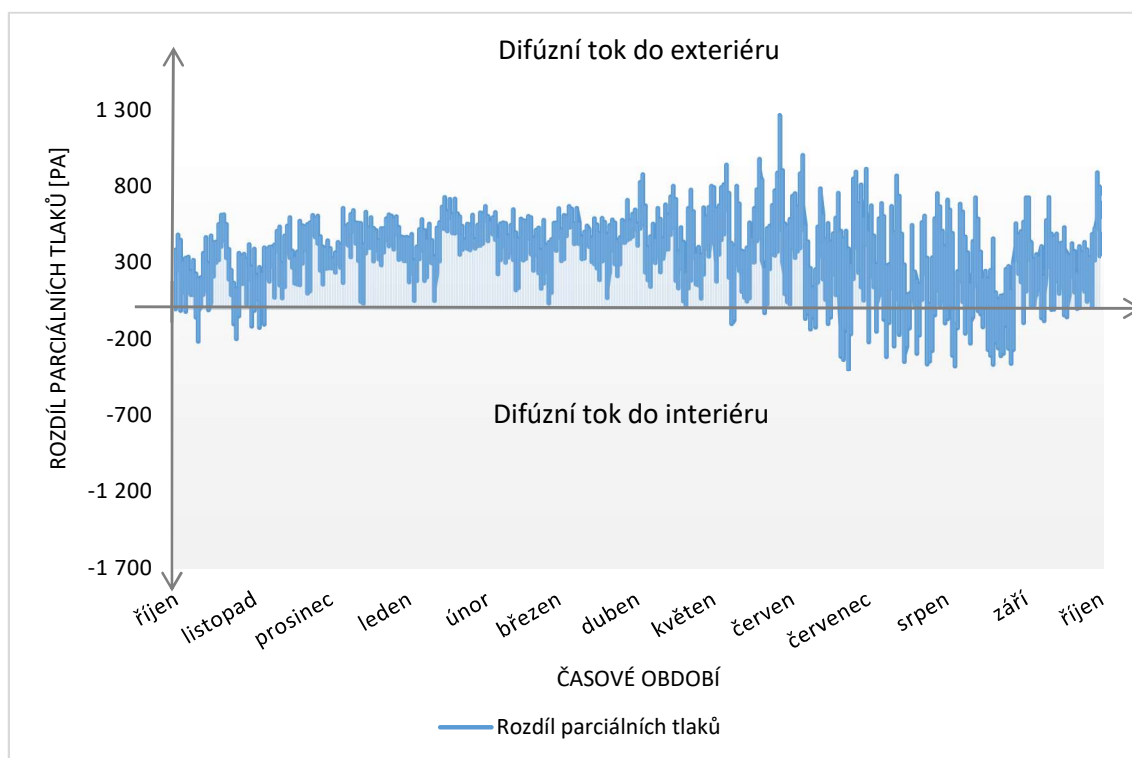
Graf 24 Průběh relativní vlhkosti v monitorovacím bodě 1 konstrukce DU Rýmařov

Z grafu je opět patrné, že relativní vlhkost od původní 80% hodnoty, která byla nastavená na počátku měření se postupně snižovala. V letních obdobích se relativní vlhkost pohybovala okolo 55 %. Pokud relativní vlhkost nedosáhne 99 % resp. 100 % v konstrukci ke kondenzaci vodních par nedochází. Problémy však mohou nastat i s nižší relativní vlhkostí než 100 % a to vzhledem k riziku růstů plísní. Viz *Analýza růstů plísní v programu Wufi Bio*.



Graf 25 Průměrný průběh relativní vlhkosti v monitorovacím bodě 1 konstrukce DU Rýmařov

Důvodem proč relativní vlhkost roste v monitorovacím bodě 1, tj. na povrchu podkladní sádrovláknité desky má za následek nejen vliv hnaného deště ale současně i otočení difúzního toku. V letních měsících, jak je možno pozorovat na grafu 26 dochází k difúznímu toku do interiéru.



Graf 26 Průběh difúzních toků konstrukcí během modelového roku konstrukce DU Rýmařov

Konstrukce obvodové stěny DO Rýmařov

Umístění monitorovacích bodů:

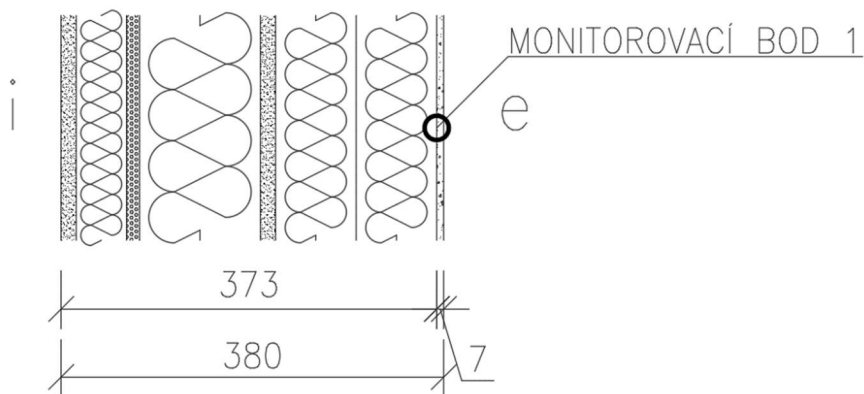
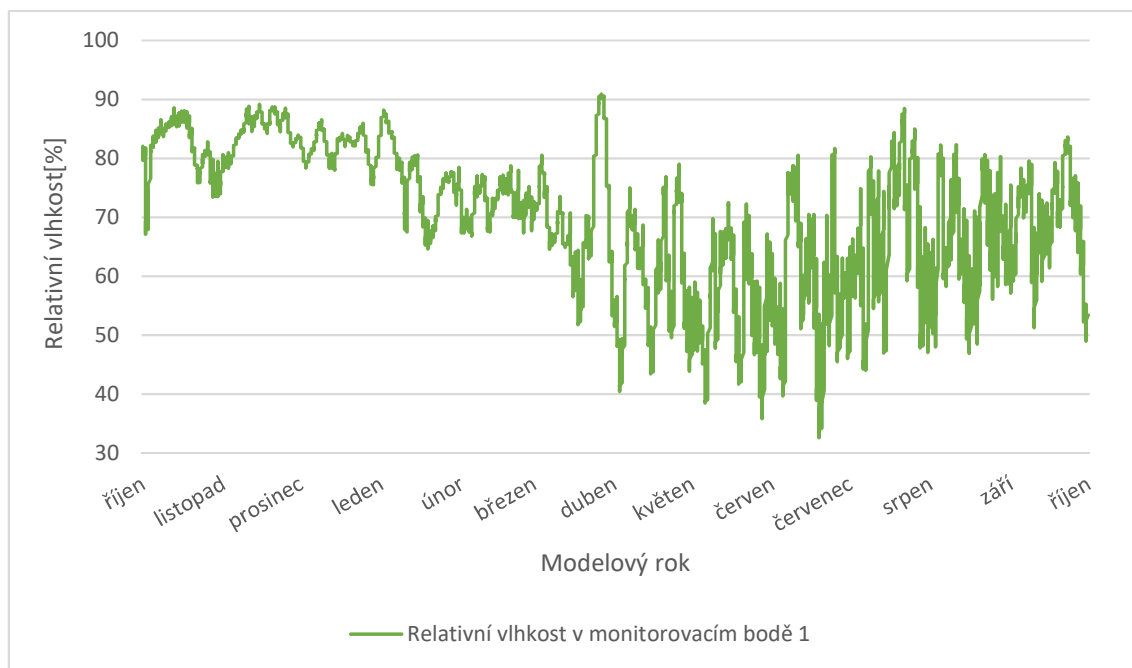


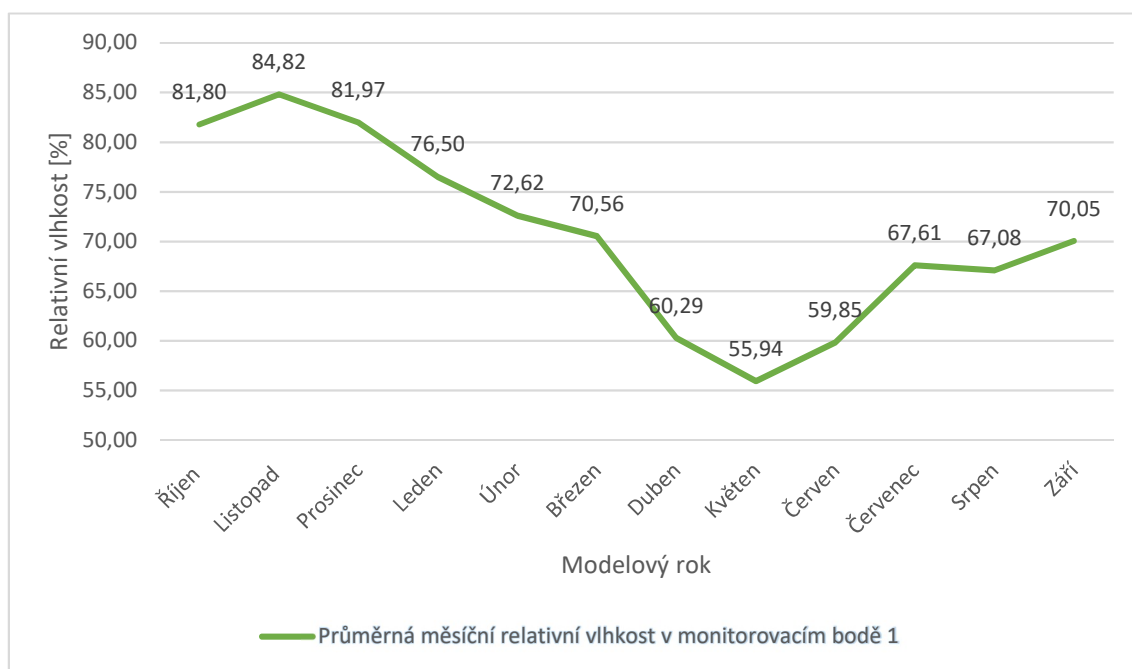
Schéma 24 Řez konstrukcí DO Rýmařov

Výsledky:



Graf 27 Průběh relativní vlhkosti v monitorovacím bodě 1 konstrukce DO Rýmařov

Daleko větší výkyvy relativní vlhkosti jsou patrné z grafu 27, který monitoruje relativní vlhkost v bodě 1 difúzně otevřené konstrukce. Takovéto velké rozdíly jsou dány pozicí monitorovacího bodu, která je na rozhraní tepelné izolace z kamenné vlny a fasádního omítkového systému. Z toho důvodu se zde daleko více projevují klimatické změny v exteriéru.



Graf 28 Průběh průměrné relativní vlhkosti v monitorovacím bodě 1 konstrukce DO Rýmařov

Konstrukce obvodové stěny DO Diffuwall 2010

Umístění monitorovacích bodů:

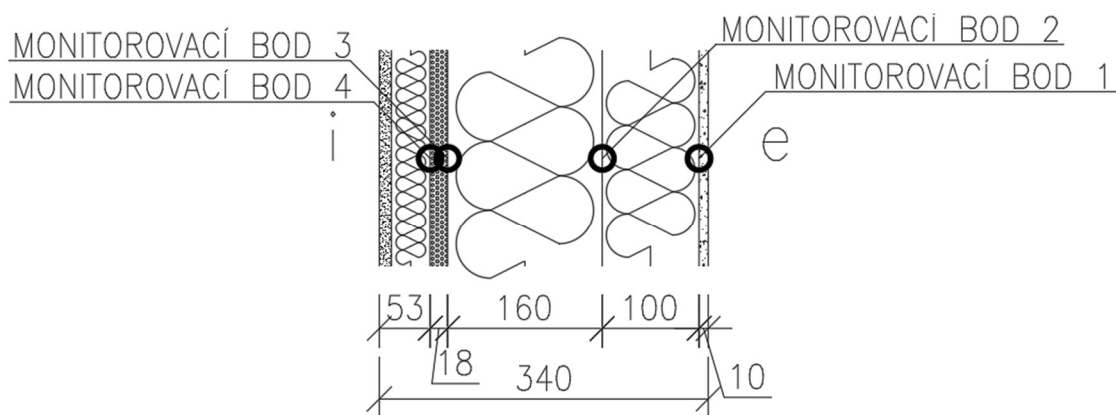
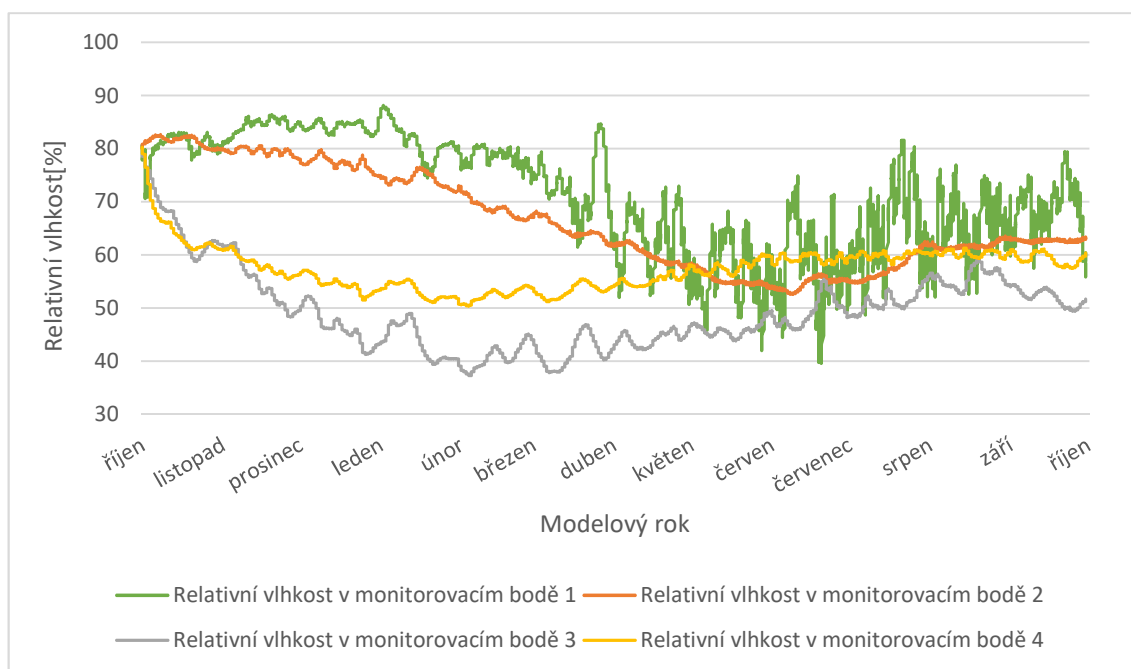


Schéma 25 Řez konstrukcí DO Diffuwall

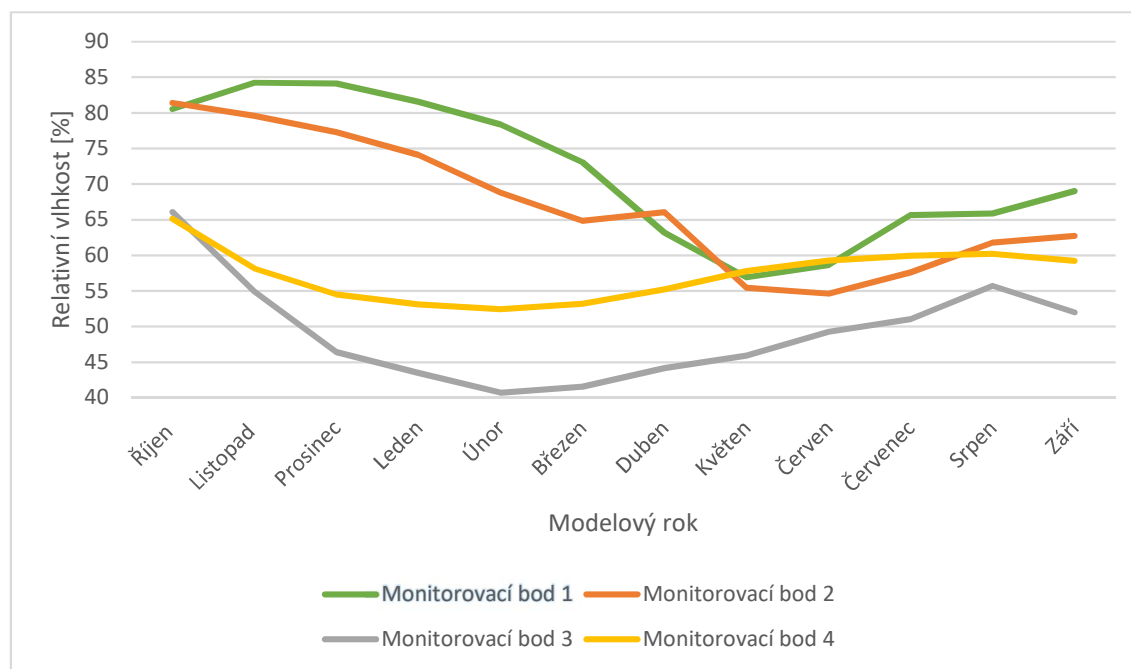
Výsledky numerické analýzy

Relativní vlhkost v monitorovacím bodě 1, který je opět umístěn, stejně jako v předchozím případě na rozhraní tepelné izolace a vnějšího omítkového systému vykazuje velké výkyvy vlivem klimatických podmínek exteriéru. Pokud se zaměříme na monitorovací bod 3, můžeme pozorovat změnu difúzního toku která v letních měsících za určitých podmínek směřuje do interiéru kde na razí na materiál s vyšším difúzním odporem tudíž zde dochází ke zvýšení relativní vlhkosti.



Graf 29 Průběh relativních vlhkostí v monitorovacích bodech konstrukce DO Diffuwall

Opačný jev je dobře viditelný na průměrných průbězích relativních vlhkostí v monitorovacích bodech. Relativní vlhkost a teplota v exteriéru začíná koncem srpna opět klesat a difúzní tok se pomalu zase otáčí zpět kdy bude směřovat z interiéru do exteriéru. To má za následek pokles relativní začátkem září v monitorovacím bodě 3.



Graf 30 Průběh průměrných hodnot relativních vlhkostí v monitorovacích bodech konstrukce DO Diffuwall

Konstrukce obvodové stěny DU American

Umístění monitorovacích bodů:

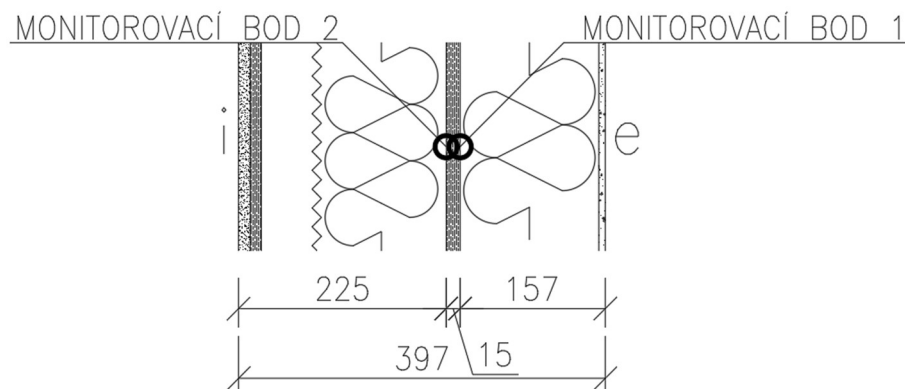
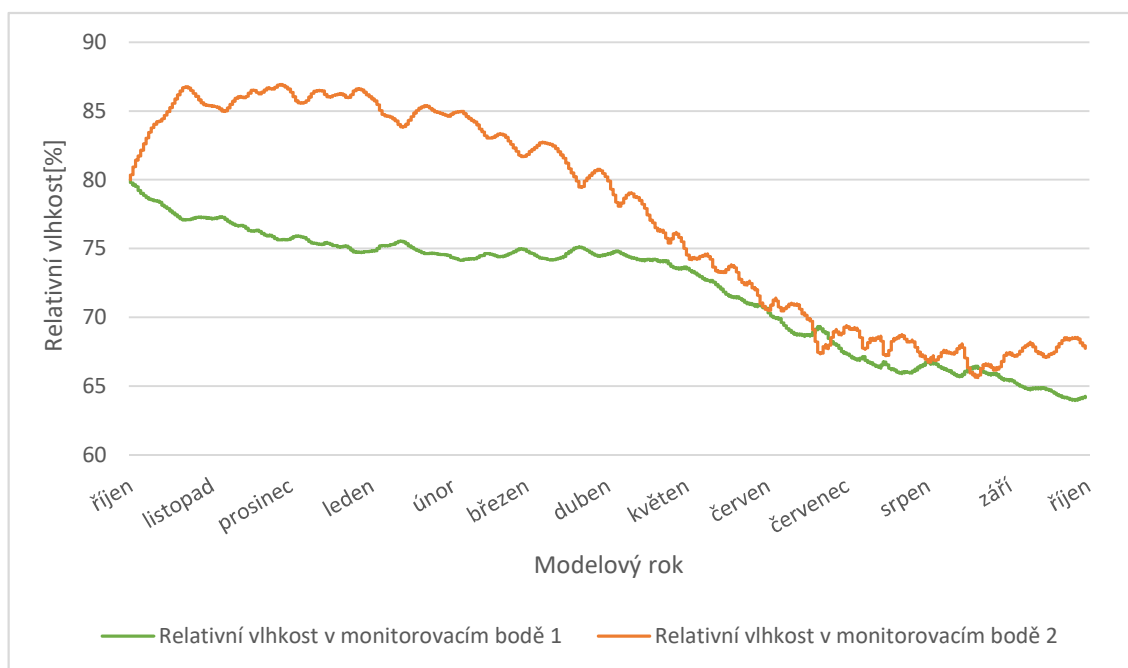


Schéma 26 Řez konstrukcí DU American

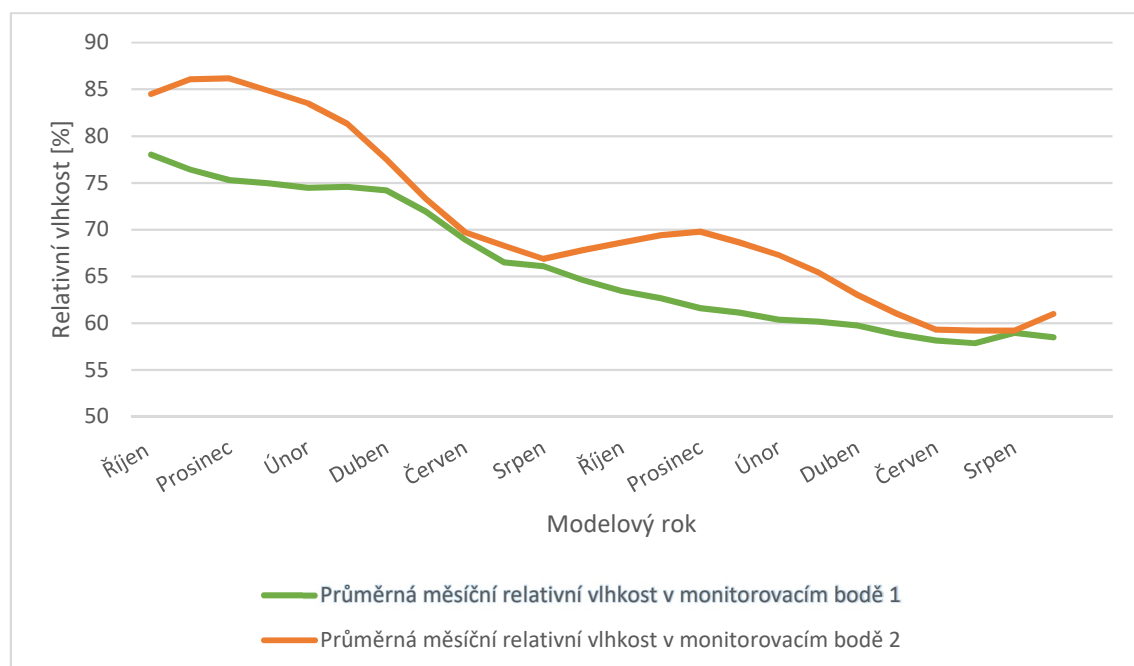
Výsledky numerické analýzy:



Graf 31 Průběh relativních vlhkostí v monitorovacích bodech konstrukce DU American

Nevhodnost použití materiálů s vysokým difúzním odporem uvnitř konstrukce je pro změnu patrné z grafu 31. Oranžová křivka monitorovacího bodu 2 která zaznamenává relativní vlhkost na OSB desce z interiérové strany vykazuje rostoucí hodnoty které se pohybují nad hranicí 85 %. Tato hranice je velice vysoká, a tudíž vhodná pro růst plísní. Více v kapitole *Analýza rizika růstů plísní*.

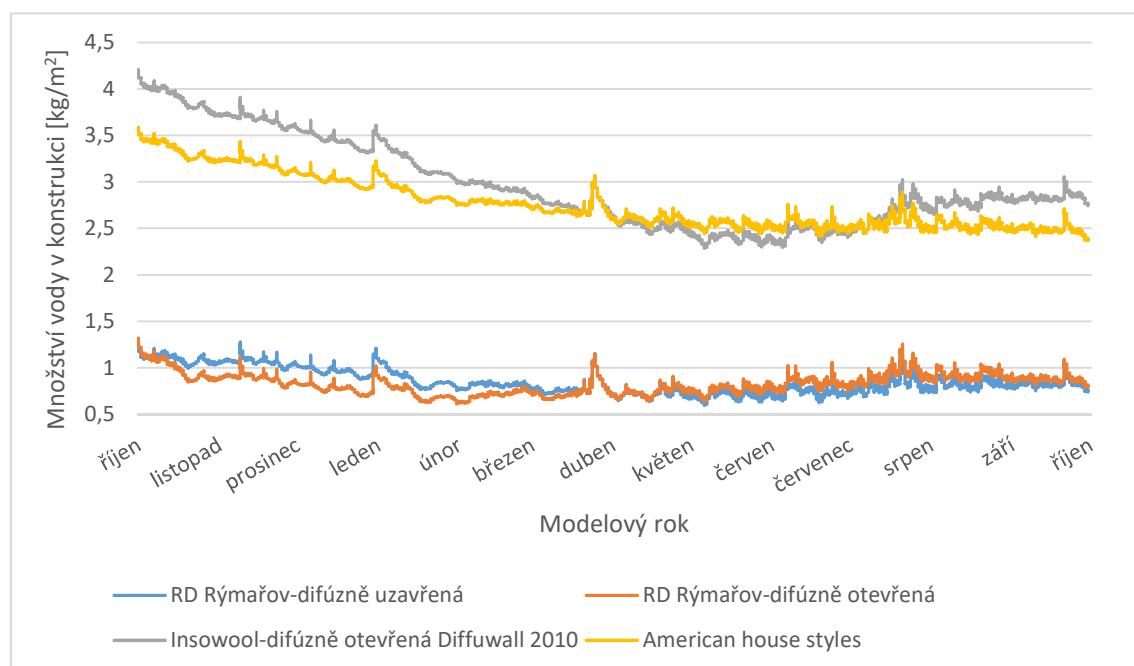
Vzhledem k tomu že konstrukce vykazovala takovéto hodnoty na začátku měření byl pro tento případ zvolen čas měření chování konstrukce dva roky. V okamžiku kdy došlo k ustálení relativní vlhkost v tomto bodě vystoupala v zimním období k hranici 70 % relativní vlhkosti.



Graf 32 Průběh průměrných relativních vlhkostí v monitorovacích bodech konstrukce DU American

Shrnutí výsledků

Z grafů je patrné že obě konstrukce společnosti Rd Rýmařov, difúzně uzavřená i otevřená se chovají z hlediska množství vody takřka stejně. Pokud by však došlo k nějakému problému vlivem nedokonalé realizace uvnitř konstrukce, daleko horší následky by vykazovala konstrukce stěny difúzně uzavřená. Vzhledem k



Graf 33 Množství vody v jednotlivých konstrukcích

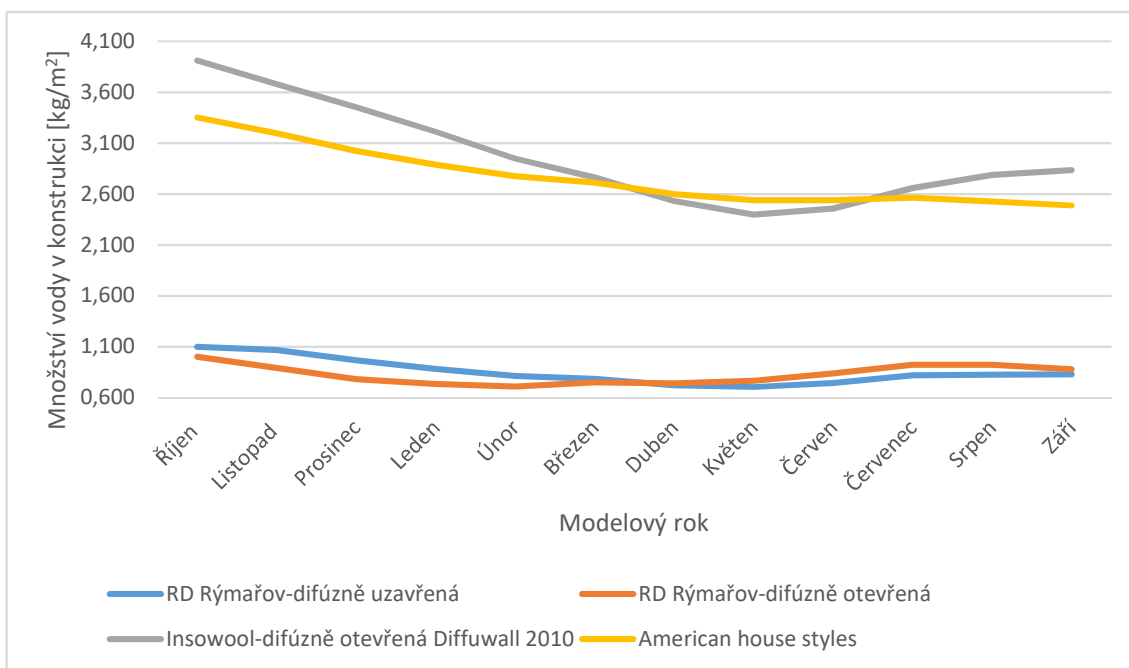
použití méně propustný materiálu pro vodní páry blíže k exteriérové straně, v případě např. špatně provedené vrstvy parozobrány by mohlo docházet ke kondenzaci vodní páry v konstrukci.

Pokud se zaměříme na začátek měření kde byla nastavená vysoká relativní vlhkost napříč konstrukcí, tak můžeme pozorovat že difúzně otevřená konstrukce se daleko dříve s touto zvýšenou hodnotou poradí než konstrukce difúzně uzavřená. Lepe řečeno daleko dříve dosáhne ustáleného stavu. Tento fakt je více viditelný na jednotlivých grafech, které množství vody v dané konstrukci znázorňují, viz přílohy diplomové práce.

Konstrukce DO Diffuwall 2010 vykazovala společně s konstrukcí DU American podobné hodnoty množství vody v konstrukci. Tyto konstrukce však oproti dvou předchozím obsahují jednu tolik vody v konstrukci, avšak daleko méně se na nich projevují vlivy klimatických změn v exteriéru či mikroklimatických změn v interiéru. To však potvrzuje fakt, který uvádí společnost Insowool, že díky jejich skladbě konstrukce bez použití parozábrany by mělo být vnitřní klima stabilnější. Reagují tak na nevyhovující tepelně vlhkostní mikroklima v budovách.

Chování difúzně otevřené konstrukce Diffuwall 2010 jako celku, můžeme přirovnat např. k chování hliněných omítek. Hlína jako taková má totiž tu schopnost, že velice dobře reaguje na změn tepelně vlhkostního mikroklimatu (*viz kapitola přírodní stavební materiály*)

Větší množství vody v konstrukci DU American má spíše za následek nevhodného uspořádání konstrukčních materiálu v konstrukci vzhledem k difúzním odporům. Faktem je že tyto konstrukce nebudou tak náchylné na lokální konstrukční nedokonalosti způsobené např. špatným užíváním objektu či již ve fázi realizace. Problém však nastává z jiného hlediska, a to rizikové hodnoty relativní vlhkosti ve zvolených monitorovacích bodech.

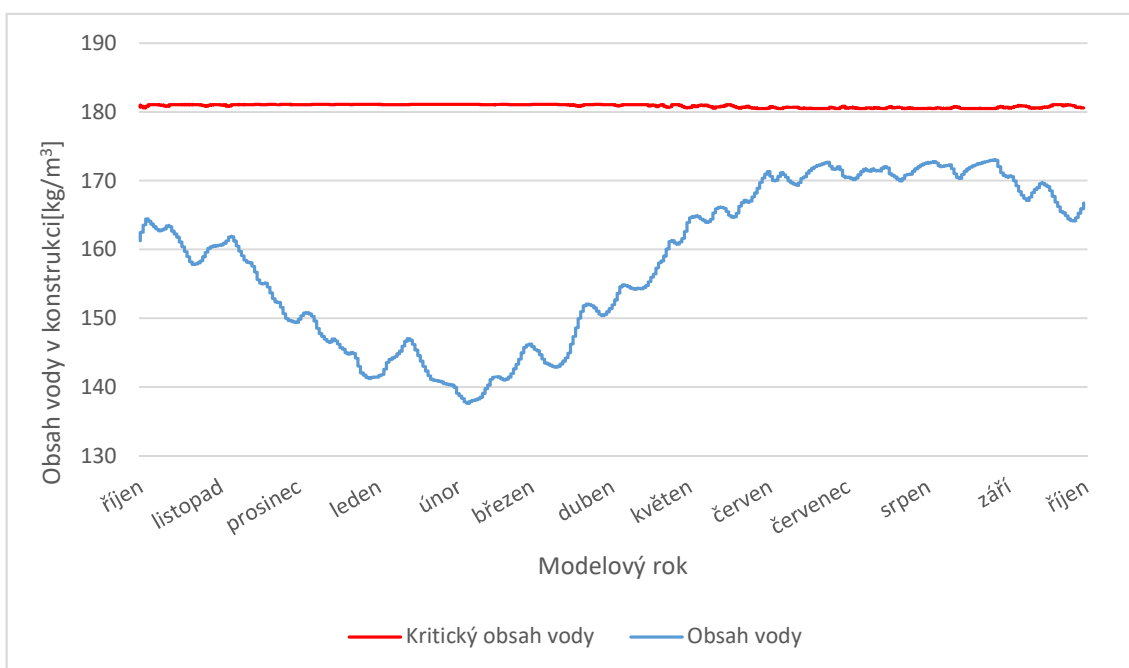


Graf 34 Průběh průměrného množství vody v konstrukci

Analýza rizika růstů plísní (Wufi-Bio)

Analýza na rizika růstů plísní může sloužit jako určitý postprocesor programu Wufi jako takového. Program Wufi Bio umožňuje analýzu konstrukcí, respektive povrchů, na základě naměřených dat teploty a relativní vlhkosti zaznamenávaných v hodinových intervalech po dobu nejméně jednoho roku. Ty můžeme získat buďto záznamem přímo na stavbě či laboratoři pomocí čidel a záznamového zařízení, nebo tyto hodnoty získat numericky např. pomocí programu Wufi.

Samotný program hodnotí nejprve vnitřní povrchy. V tomto případě všechny konstrukce vykazovaly relativně stejné hodnoty z důvodu velice podobných povrchových teplot a relativních vlhkostí. Všechny konstrukce na vnitřním povrchu tedy vyhověly na riziko růstu plísní.

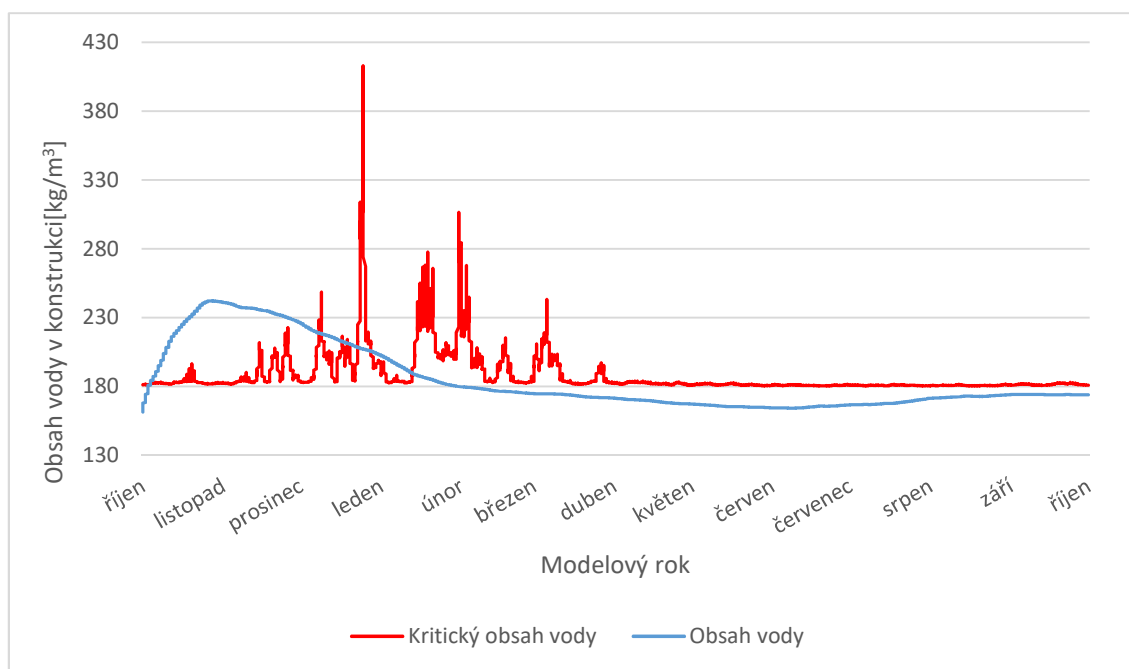


Graf 35 Analýza na riziko růstu plísní na vnitřním povrchu konstrukce DU Rýmařov

Pro další analýzu byly vybrány místa jednotlivých monitoračních bodů v konstrukcích, které pomocí dat exportovaných z Wufi (teplota a relativní vlhkost) byly importovaly do programu Wufi Bio, kde byla provedena jejich následná analýza.

Monitorovací body v konstrukci DO Diffuwall nevykazovaly během modelového roku problémy s rizikem růstu plísní. Jejich obsah vody byl ve většině případů v dostatečné vzdálenosti od hranice pro kritický obsah vody.

Konstrukce DU Rýmařov je na tom z tohoto hlediska podstatně hůře. Analýza zaznamenává zvýšený růst plísní. V době, kdy obsah vody klesne pod kritickou hodnotu se růst zastaví cca na 85 mm. Pomocí plísňového indexu se jedná o plíseň viditelnou pouze mikroskopem. Po době, kdy se dostane křivka obsahu vody pod kritickou hranici tak zde zůstává i po zbytek modelového roku.

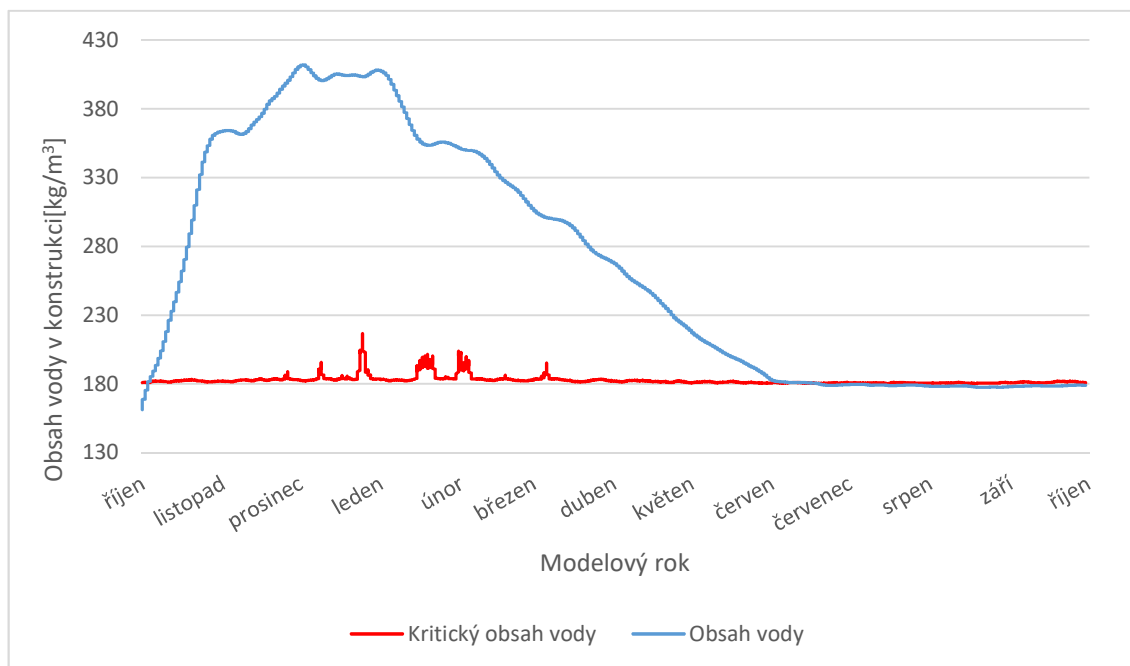


Graf 36 Analýza na riziko růstu plísní v monitorovacím bodě 1 konstrukce DU Rýmařov

Vzniklé riziko je dáno nastavenou zvýšenou vlhkostí na začátku numerické analýzy. V ostatních letech za stejných okrajových podmínek by toto riziko nemělo přetrvávat. Avšak toto místo by mohlo být rizikové v případě určitých nedokonalostí při špatné realizaci či následném užívání stavby, protože křivka obsahu vody není v druhé polovině modelového roku od křivky kritického obsahu vody v dostatečně velké vzdálenosti, jako tomu bylo například u předchozí konstrukce

Důvod proč křivka kritického obsahu vody tak silně osciluje je dáno pozicí monitorovacího bodu blíže k exteriéru, tudíž zde dochází k velkým kmitům teploty.

Konstrukce DU American vykazovala v porovnání s ostatními konstrukcemi v místě monitorovacích bodů nejlepší podmínky pro růst plísní. Nejkritičtější místem z tohoto pohledu je monitorovací bod 2 (povrch OSB desky blíže k interiéru). Celý problém spočívá z důvodu, který byl již zmiňován v kapitole, *Celkové množství vody v konstrukci a průběh relativní vlhkosti v jednotlivých monitorovacích bodech (WUFI 5)*. Je to důvod špatně poskládaných materiálů v konstrukci z hlediska difúzních odporů. Materiál OSB desky má vysoký difúzní odpor tudíž v konstrukci působí jako parobrzda. Tato vlastnost by byla žádoucí v případě kdy by byla OSB deska situována v těsné blízkosti interiérové strany. V případě této konstrukce však místo pro použití tohoto materiálu nebylo vybráno moc vhodně.



Graf 37 Analýza na riziko růstu plísní v monitorovacím bodě 2 konstrukce DU American

Z průběhů relativních vlhkostí v dalším roce, viz předchozí kapitola, je patrné že takováto zvýšená vlhkost na začátku modelového roku se v dalších letech snížila, avšak obě křivky obsahu vody a kritického obsahu vody jsou v tak těsné blízkosti i v letních obdobích, takže i přesto by mohlo být tohle místo zdrojem budoucích problémů.

Grafický výstup z analýzy monitorovacího bodu označeného 1 bude stejně jako v případě konstrukce DO Diffuwall součástí příloh diplomové práce.

Monitorovací body, které jsou v těsné vzdálenosti od povrchu exteriéru analýze neproběhnout. Jsou to body na rozhraní tepelného izolantu a vnějšího omítkového systému. Jelikož je ve všech případech použit omítkový systém s nízkým difúzním odporem, tak záznam zejména relativní vlhkosti zde dosti osciluje zejména kvůli zvýšené vlhkosti např. při dešťových srážkách, a tudíž by vyhodnocení naznačovalo zvýšené riziko, stejně jako na exteriérovém povrchu.

14 Experimentální měření difúzních vlastností materiálů

Následující část diplomové práce se věnuje metodám stanovení difúzních vlastností materiálů. Následně proběhne experimentální měření difúzních vlastností parozábrany jednou z metod. Jednotlivé vzorky budou různě perforovány a bude sledován vliv perforace na hodnotu difúzního odporu. Získané informace se použijí k opětovnému tepelně vlhkostnímu posouzení konstrukcí, které tento typ parozábrany obsahují a bude pozorován vliv perforace na celkové tepelně vlhkostní chování konstrukce.

14.1 Metodika pro naplnění dílčího cíle

Difúzní vlastnosti materiálu se popisují pomocí dvou veličin. Suchých, tj. suchý faktor difúzního odporu, suchá hodnota ekvivalentní difúzní tloušťky a suchý součinitel difúzní vodivosti. Mokrých, tj. mokrá faktor difúzního odporu, mokrá hodnota ekvivalentní tloušťky a mokrá součinitel difúzní vodivosti.

Vzájemné vztahy jmenovaných veličin:

$$s_{dx} = \mu_x \cdot d = \frac{\delta_o}{\delta_{px}} \cdot d = \frac{d}{N \cdot \delta_{px}} \quad (7)$$

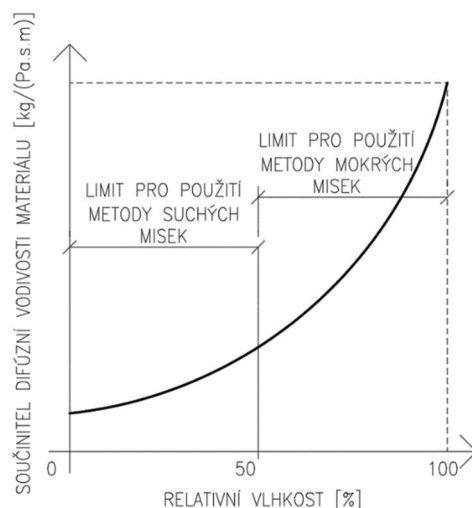
kde	d	tloušťka materiálu [m]
	S_{dx}	suchá/mokrá hodnota ekvivalentní difúzní tloušťky materiálu [m]
	μ_x	suchý/mokrá faktor difúzního odporu [m]
	δ_{px}	suchý/mokrá součinitel difúzní vodivosti materiálu [kg/(Pa.s.m)]
	δ_o	součinitel difúzní vodivosti vzduchu [kg/(Pa.s.m)]
	N	teplotní difúzní funkce [s ⁻¹]

Za písmeno „x“ se v případě vztahu pro suché veličiny dosadí písmeno „d“ (dry) a v případě vztahů mokrých veličin písmeno „w“ wet.

Důvodem proč se používají suché a mokré veličiny pro popis difúzních vlastností materiálu jsou zejména přesnější hodnoty udávaných výrobcí daných materiálu. Norma stanovuje že suché veličiny by se měly používat v případě, kdy relativní vlhkost v zimním období ve vnitřním prostředí je menší nebo rovna 60 %. Mokré veličiny se naopak používají v případě vyšších relativních vlhkostí nad 60 %. Toto dělení vychází z laboratorního měření difúze tzv. miskových metod, které se provádí odlišnými způsoby. Je to metoda WET-CUP „mokrá miska“ a DRY-CUP „suchá miska“. Princip měření je podobný, kdy měřeným

vzorkem difunduje vodní pára a v závislosti na čase se vypočte potřebná difúzní veličina. Rozdíl tkví v odlišných okrajových podmínkách. [39]

To, čím chce norma rozdělením na dvě metody poukázat je propustnost vodní páry v závislosti na relativní vlhkosti v které se zkoumaný materiál nachází viz *ilustrace 21*.



Ilustrace 21 Graf závislosti součinitele difúzní vodivosti materiálu na relativní vlhkosti [39]

Hodnota difúzní vodivosti materiálu roste se vzrůstající relativní vlhkostí. Tento graf však znázorňuje tuto závislost pro dobře propustné materiály, jakou jsou např. tepelné izolace. U málo propustných materiálů jako jsou hydroizolační pásy a parotěsnicí zábrany se hodnoty součinitele difúzní vodivosti v závislosti na relativní vlhkosti mění minimálně.

Mimo rozdílnou relativní vlhkost při použití miskových metod měření difúzních vlastností materiálů jsou zde další odlišnosti, které jsou typické pro jednotlivé metody.

Metoda suchých misek

Pod vzorkem silikagel (suché prostředí) nad vzorkem definované prostředí v klimatické komoře => transport vodní páry z misky do okolního prostředí. Zjišťují se přírůstky hmotnosti.

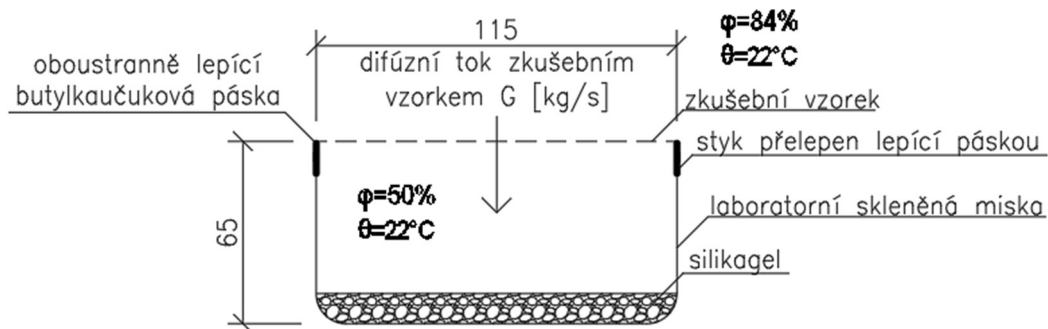
Metoda mokrých misek

Pod vzorkem voda (nasycená vodní pára), nad vzorkem definované prostředí v klimatické komoře => transport vodní páry z misky do okolního prostředí. Zjišťují se úbytky hmotnosti.

Misky se vzorky se periodicky váží a zjištěné úbytky, respektive přírůstky hmotnosti se vynesou v závislosti na době vážení do grafu. Po dosažení přímkového charakteru křivky se měření dá považovat za ukončené a může se přejít k vyhodnocení.

Metoda stanovení difúzních vlastností parozábrany s nebo bez lokální perforace

Pro experimentální ověření způsobu lokální perforace parozábrany na hodnotu difúzního odporu byla použita metoda suchých misek (viz odstavec výše).



Ilustrace 22 Podstata zkoušky metody suchých misek

Zkušební zařízení a prostředky pro experiment:

- Zkušební skleněné misky kruhového tvaru
- Posuvné milimetrové měřidlo pro určení tloušťky vzorku a průměru misky
- Analytické váhy
- Exikátor s neustálým měřením teploty a relativní vlhkosti
- Těsnící materiál nepropouštějící vodní páru – oboustranně lepící butylkaučuková páska bez armatury
- Lepící páska
- Vysoušecí silikagel pro exikátory modrý
- Vodný roztok chlorid draselný KCl pro vytváření stanovené hodnoty relativní vlhkosti vzduchu

Postup měření:

1 Příprava zkušebních vzorků

- Nastříhání jednotlivých zkušebních vzorků fóliové parozábrany na požadovaný tvar a velikost
- Změření tloušťky vzorků na čtyřech místech po obvodu a určení průměrné tloušťky každého zkušebního vzorku
- Dále byl změřen průměr zkušební misky a výpočet kruhové plochy otevřené pro difúzní tok

2 Zvážení prázdných misek a navážení silikagelu

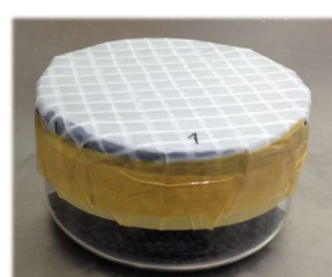
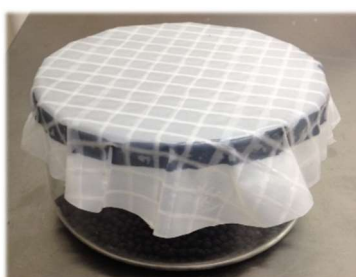
- 40 g do každé misky



Ilustrace 23 Vážení prázdných misek a následné navážení silikagelu na analytické váze

3 Osazení zkušebních vzorků na připravené misky

- Na okraj misky byla nalepena oboustranná lepicí páska
- Osazení zkušebního vzorku na připravený podklad
- Z důvodů vnášení co nejmenší chyby měření byl následně ještě přelepen dvakrát styk misky a parozábrany lepicí páskou



Ilustrace 24 Postup přípravy vzorku

4 Lokální perforace

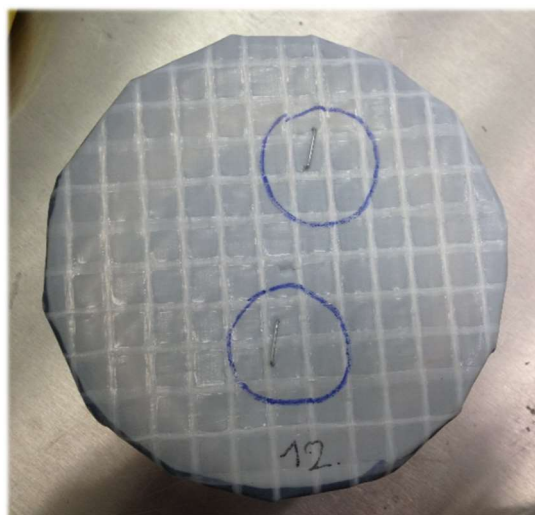
- Tři vzorky byly ponechány bez perforace
- Tři vzorky byly perforovány jednou sponkou a sponka byla následně vytažena
- Tři vzorky byly perforovány opět jednou sponkou, ale sponka byla ve vzorku ponechána
- Poslední tři vzorky byly lokálně perforovány dvěma sponkami a spony byly opět ve vzorku ponechány



Ilustrace 25 Perforace jednou sponkou, sponka ponechána ve vzorku



Ilustrace 26 Perforace jednou sponkou, sponka vytažena



Ilustrace 27 Perforace dvěma sponkami, sponky ponechány ve vzorku

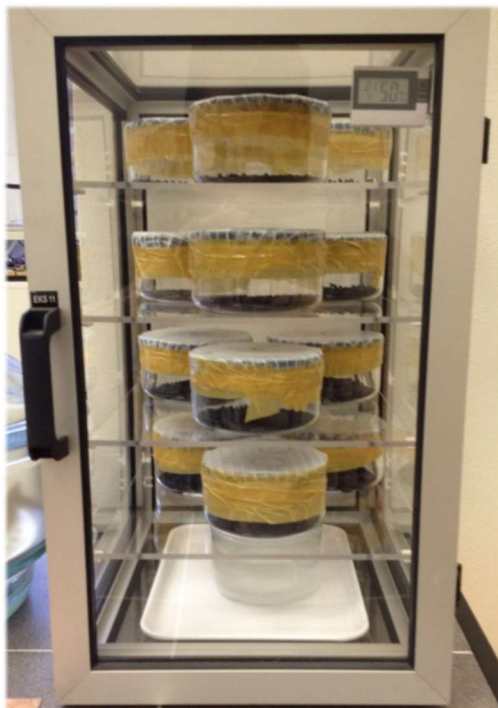
5 Opětovné vážení

- Poslední vážení před začátkem měření kompletního vzorku podléhajícího experimentu



Ilustrace 28 Vážení kompletně připraveného vzorku

6 Vložení vzorků do exikátoru společně s namíchaným vodným roztokem



Ilustrace 29 Exikátor s vloženými vzorky

- 7 Opětovné vážení vzorků a sledování přírůstků hmotností v závislosti na čase**
- 8 Výpočet a vyjádření výsledků difúzních vlastností parozábrany na základě naměřených dat**

Odchyly od ČSN EN ISO 12572 z důvodu specifického charakteru vzorku a požadavků diplomové práce jsou zejména tyto:

- Počet zkušebních vzorků je z důvodu počtu exikátorů a možnosti měření zvoleny pouze 3 namísto 5 které uvádí norma
- Okrajové podmínky zvoleny dle chemických látek dostupných na UPST.

14.2 Dílčí výsledky experimentálního měření difúzních vlastností foliové parozábrany s různou perforací

Misky se vzorky byly váženy a zjištěné přírůstky hmotnosti se byly vyneseny v závislosti na době vážení do grafu. Vzhledem k okolnostem, neprobíhalo vážení vzorků periodicky. Abychom však získaly potřebnou informaci k tomu, kdy je možné zkoušku zastavit a přejít k vyhodnocení byla jednotlivá časová období vždy přepočtena na přírůstky za den. Po dosažení přímkového charakteru křivky se měření dá považovat za ukončené a může se přejít k vyhodnocení. Po 27 dnech byly přírůstky konstantní, zkouška byla tedy

ukončena. Na základě naměřených dat, byl stanoven faktor difúzního odporu dle ČSN EN ISO 12572.

Pro prezentování výsledků difúzních vlastností parozábrany byla vybrána veličina faktor difúzního odporu. Jednotlivé výsledky faktorů difúzních odporu byly vždy v každé kategorii vzorků zprůměrovány a byla vyčíslena pouze jedna hodnota charakterizovaná danou kategorií vzorků, viz tabulka 24.

Tabulka 24 Faktor difúzního odporu v závislosti na perforaci parozábrany

Ozn. vzorku	Perforace	Vyjádření v %	Průměr $\mu[-]$
1 2 3	Neperforovaná	100	38 126
4 5 6	Jednou sponkou, sponka vytažena	48	18 471
7 8 9	Jednou sponkou, ponechána ve vzorku	62	23 676
10 11 12	Dvěma sponkami, ponechány ve vzorku	69	26 208

Hodnoty materiálových vlastností uváděné výrobcem zvoleného typu parozábrany:

- Více vrstvá polyetylenová parozábrana zpevněná perlinkovou mřížkou
- Ekvivalentní difúzní tloušťka $S_d=50 \pm 10$ m
- Tloušťka 0,25 mm
- Faktor difúzního odporu je poté tedy $\mu=200000 \pm 40000$

Po porovnání tabulky 24 a hodnot materiálových vlastností uváděných výrobcem parozábrany podléhající experimentálnímu měření je patrné, že difúzní vlastnosti jsou několika násobně odlišné. Příčina mohla nastat velikostí zkušebního vzorku. Z toho důvodu se přistoupilo k výsledkům měření tak že naměřeným průměrným hodnotám faktoru difúzního odporu byly přiřazeny procentuální váhy.

Numerická tepelně vlhkostní analýza konstrukce DU Rýmařov a DU American s vlivem perforace parozábrany

Pomocí procentuálního vyjádření snížení μ vlivem perforace zjištěných experimentálním měřením se přepočítaly hodnoty μ u parozábran použitých v jednotlivých konstrukcích, viz tabulka 25.

Tabulka 25 Vlastnosti parozábran použitých v konstrukcích DU American a DU Rýmařov

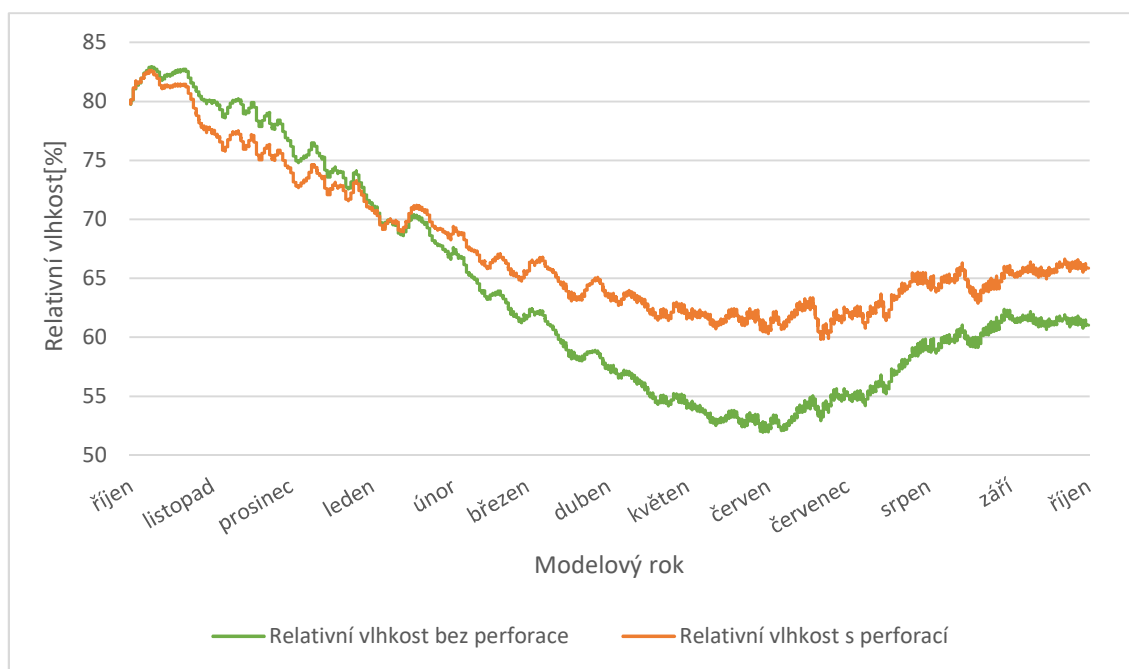
Typ parozábrany	$\mu[-]$ uváděný výrobcem	$\mu[-]$ snížený vlivem perforace na 50%	$\mu[-]$ snížený vlivem perforace na 65%
Polyetylenová fólie Homeseal LDS 100	500 000	250 000	325 000
Polyolefinová fólie s výztužnou mřížkou a reflexní aluminiovou vrstvou	1 600 000	800 000	1 040 000

Na průběhu relativních vlhkostí v monitorovacích bodech snížení, respektive zvýšení faktoru difúzního odporu mezi hranicí 50 % a 65 % nebyla patrná. Proto budou dále porovnávány pouze hodnoty bez perforace a s 50% snížením μ .

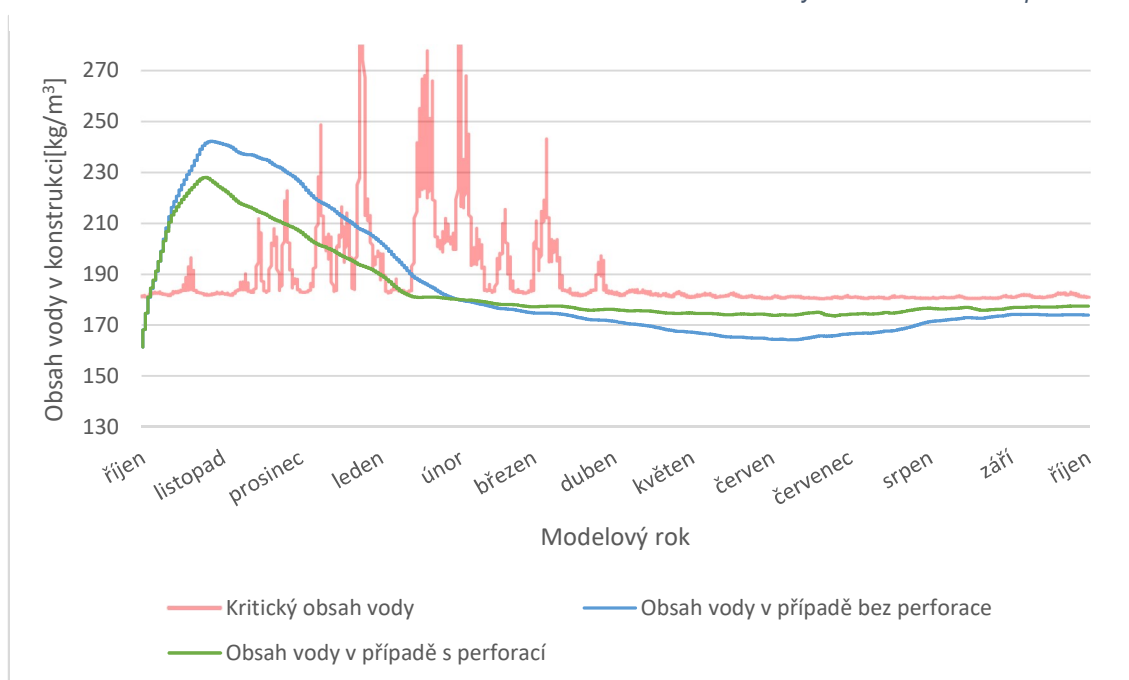
DU Rýmařov

V případě konstrukce DU Rýmařov je na grafu 38 jasně patrná závislost mezi oběma variantami, tj. bez perforace a se snížením faktoru difúzního odporu o 50 %. V případě druhém, kdy je snížena hodnota difúzního faktoru, zabudovaná prvopočáteční vlhkost 80% daleko rychleji klesala oproti konstrukci kde byla použita parozábrana bez jakékoliv perforace. Stejný fakt byl patrný v porovnání druhé konstrukce od společnosti RD Rýmařov z hlediska množství vody v konstrukci, viz kapitola 13.2. V letních měsících je rozdíl v relativních vlhkostech obou variant v průměru 9 %, kdy vyšší hodnota vykazuje samozřejmě konstrukce s perforovanou parozábranou

Konstrukce byla posouzena i v softwaru Wufi Bio. Snížením difúzního faktoru konstrukce vykazuje menší riziko pro růst plísní než v případě bez perforace, vzhledem k tomu že se daleko rychleji vyrovná se zvýšenou relativní vlhkostí na začátku měření. Pokud bychom se zaměřili na další část modelového roku, poté by bylo z grafu patrné, že konstrukce sice vykazuje celkově menší riziko, avšak obsah vody v konstrukci v dalších měsících je blíže ke kritické hodnotě, než tomu bylo v případě neperforované parozábrany. Z tohoto pohledu by se dalo tedy toto místo vyhodnotit za rizikovější než v případě použití neperforované parozábrany.



Graf 39 Průběh relativní vlhkosti v monitorovacím bodě u konstrukce DU Rýmařov s a bez vlivu perforace



Graf 38 Analýza rizika na růst plísní konstrukce DU Rýmařov S a bez perforace parozábrany

DU American

Konstrukce DU American, vůbec na změnu faktoru difúzního odporu vlivem perforace o 50 % ze své původní hodnoty nereaguje. Důvodem je použití daleko kvalitnější parozábrany, co se týče difúzních vlastností než u konstrukce DU Rýmařov. Zhoršená hodnota difúzního odporu v případě reflexní polyolefinové folie totiž i tak vykazuje více jak 3krát lepší hodnoty. Z toho plyne závěr, že by v tomto případě stačila použít fólie s horšími difúzními vlastnostmi a na konstrukci to nebude mít žádný vliv.

15 Závěr

V posledních letech se nejen oblast stavebnictví posunuje směrem šetření energií, jak ve fázi výstavby či při výrobě samotného konstrukčního materiálu tak ve fázi užívání objektu. Abychom co nejvíce eliminovaly ztráty prostupem, dochází k nadměrnému zateplování konstrukci doprovázené velkou vzduchotěsností obvodových plášťů a tím vytváření takřka hermeticky oddělených prostředí. Faktory, které více či méně ovlivňují parametry vnitřního mikroklimatu vystihlo experimentální měření ve dvou dalo by se říci odlišných prostředí bytových staveb z hlediska kvality obvodových plášťů. Analýzou experimentálního měření bylo dokázáno že hodnoty výpočtové při tepelně vlhkostním hodnocení konstrukcí obklopujících toto prostředí se běžně pohybují v úplně jiných hodnotách. Analýzou bylo dále poukázáno na závislost jednotlivých složek vnitřního mikroklimatu mezi sebou či na exteriérových podmínkách.

Dalším cílem diplomové práce bylo to nejdůležitější, a to samotné tepelně vlhkostní namáhání stěny dřevostavby. Byly vybrány a následně numericky, z hlediska tepelně vlhkostního, analyzovány, 4 běžně se používající konstrukce dřevostaveb, tedy respektive staveb na bázi dřeva.

Při použití klasických normových numerických postupů, Svoboda software-Teplo 2014, konstrukce bez problému vyhoví z hlediska tepelně vlhkostního chování, dalo by se říci i s relativně velkou rezervou. Software v tomto případě pohlíží na okrajové podmínky z pohledu stacionárního. Legislativa však připouští i jiné postupy tepelně vlhkostní analýzy. Jedním z nich je software Wufi který zohledňuje mnoho dalších faktorů při výpočtu a co je hlavní numerická analýza probíhá za nestacionárních podmínek. Z analýz a porovnání výsledků obou výstupů bylo patrné že v případě složitějších konstrukcí z pohledu stavební fyziky, informace získané analýzou v prvním v software může uvádět projektanty v omyl, že konstrukce je navržena s dostatečnou rezervou. Podrobnější analýzou bylo zjištěno že rezervy, které dle předchozího hodnocení byly dostačující se následně ukázaly jako nereálné. Konstrukce DU American je např. svou nevhodnou skladbou na hraně již při hodnocení v 1D prostředí. V případě 2D nebo 3D řešení kritický detailů, bude konstrukce z největší pravděpodobností vykazovat daleko větší rizika než v případě jednodimenzionální varianty.

V poslední částí části diplomové práce proběhl experiment vlivu perforace parozábrany na její difúzní vlastnosti. Z analýzy naměřených dat můžeme konstatovat že např. pouhá perforace jednou sponkou na vzorku o ploše 0,01 m² vykazovala zhruba 50 % zhoršení difúzních vlastností parozábrany. U konstrukce, kde byla použita kvalitnější parozábrana toto zhoršení nebylo patrné. Méně kvalitní parozábrany na tom byla o podstatně hůře. Opět se však bavíme pouze o 1D prostředí. Samotné řešení kritických detailů je vhodné téma klidně i nové diplomové práce.

Z obdržených výsledků analýz a zjištěných spousty poznatku, existuje celá řada možností, jakými na tuto problematiku navázat a dále rozvádět.

16 Seznam použitých zdrojů

- [1] Martin Růžička. *Stavíme dům ze dřeva*. U průhonu 22, Praha 7: Grada Publishing, a.s., 2006. ISBN 80-247-1461-2
- [2] Jiří Vaverka, Zdeňka Havířová, Miroslav Jindrák a kol.. *Dřevostavby pro bydlení*. U průhonu 22, Praha 7: Grada Publishing, a.s., 2008. ISBN 978-80-247-2205-4.
- [3] Dřevostavitel Online svět dřevostaveb. *Dřevostavitel*. [online]. 17.8.2016 [cit. 2016-09-20]. Dostupné z: <http://www.drevostavitel.cz/clanek/kolik-drevostaveb-se-stavi-v-ceske-republice>
- [4] Ing. Vratislav Blaha, CSc. tzbinfo. © Copyright Topinfo s.r.o. 2001-2015. [online]. 19.4.2016 [cit. 2016-09-28]. Dostupné z: <http://stavba.tzbinfo.cz/drevostavby/14065-soucasnost-a-perspektivy-vystavby-drevenych-montovanych-domu-v-ceske-republice>
- [5] Český statistický úřad. [online]. 29.9.2016 [cit. 2016-09-29]. Dostupné z: <https://www.czso.cz/>
- [6] RNDr. Klíma Jiří. Deník veřejné zprávy. 2016 Triada, spol. s r. o., Praha. [online]. 22.9.2011 [cit. 2016-09-27]. Dostupné z: <http://denik.obce.cz/clanek.asp?id=6505642>
- [7] WOOD-LIFE CZ s.r.o. WOOD-LIFE CZ. Copyright 2011 wood-life cz s.r.o. [online]. [cit. 2016-09-27]. Dostupné z: <http://www.woodlife.cz/roubenky-sruby>
- [8] OK PYRUS. MODERNÍ SRUBOVÉ DOMY A ROUBENKY. © 2009–2013 Sruby OK PYRUS, s.r.o. [online]. [cit. 2016-09-27]. Dostupné z: <http://www.moderni-sruby.cz/technologie-vystavby-srubu-a-roubenky.html>
- [9] Bc. Nováček Petr, DiS. *Protokol o výpočtu*. Na Florenci 7-9, 111 71 Praha 1: Výzkumný a vývojový ústav dřevařský, 2013. ISBN
- [10] Slanina, P. *Dynamické tepelně vlhkostní hodnocení stavebních konstrukcí*. Tepelná ochrana budov (5) 16, 2013, 32-39.
- [11] ČUPROVÁ, Danuše. *Tepelná technika budov*. Brno: © Ing. Danuše Čuprová, CSc., 2016. ISBN.
- [12] FICKER, Tomáš. *Aplikovaná Fyzika (S), Modul 02 Kondenzace ve stavebních konstrukcích*. Brno: © Prof. RNDr. Tomáš Ficker, DRSc, 2008. ISBN
- [13] ŠÁLA, Jiří, Lubomír Keim, Zbyněk Svoboda, Jan Tywoniak. *Komentář k ČSN 73 0540 Tepelná ochrana budov*. Praha: Informační centrum ČKAIT, 2008. ISBN 978-80-87093-30-6.
- [14] ČSN 730540-2. *Tepelná ochrana budov. Část 2: Požadavky*: © Český normalizační institut, 2002.

- [15] Český hydrometeorologický ústav. *CERTIFIKÁTY ISO 9001-2008*. [online]. [cit.2016-09-28]. Dostupné z: <http://portal.chmi.cz/historicka-data/pocasi/uzemni-teploty#>
- [16] Ing. Olga Rubínová, Ph.D. *CT 52 Technika prostředí* [online]. 2015. [cit. 2016-10-11]. ISBN. Dostupné z: <http://lms.fce.vutbr.cz/course/view.php?id=190>
- [17] Ing. Rubínová Olga, Ph.D. *Vzduchotechnika*. Brno: ERA group, spol. s.r.o., 2007. ISBN 978-80-7366-091-8.
- [18] JOKL Miloslav. *Zdravé obytné a pracovní prostředí*. Praha 2: Akademie věd České republiky, 2002. ISBN 80-200-0928-0.
- [19] Okenní centrum. *Free CSS Templates*. [online]. [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: <http://vase-okno.cz/rosi-se-vam-okna-co-s-tim.html>
- [20] Hobby.cz. *Idnes.cz*. [online]. 1.2.2010 [cit. 2017-01-02]. Dostupné z: http://hobby.idnes.cz/za-kondenzaci-vody-na-okennim-skle-vetsinou-muze-nespravne-vetrani-1ps-/hobby-domov.aspx?c=A100201_073414_hobby-domov_bma
- [21] Ing. Gunter Gebauer, CSc.. *CT 52 Technika prostředí* [online]. 2015. [cit. 2016-10-11]. ISBN . Dostupné z: <http://lms.fce.vutbr.cz/course/view.php?id=190>
- [22] *Odborná přednáška firmy Atrea* [online]. 2016. [cit. 2017-01-12]. ISBN . Dostupné z: *PDF soubor*
- [23] Ing. Miloš Lain. *tzbinfo*. © Copyright *Topinfo s.r.o.* . [online]. 6.11.2006 [cit. 2017-09-23]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3648-zpetne-ziskavani-tepla-ve-vetrani-a-klimatizaci-i>
- [24] Ing. Zdeněk Zikán. *tzbinfo*. © Copyright *Topinfo s.r.o.* . [online]. 23.3.2010 [cit. 2016-09-23]. Dostupné z: <http://vetrani.tzb-info.cz/vetrani-s-rekuperaci/6325-zpetne-ziskavani-tepla-a-vetrani-objektu>
- [25] Ing. Miloš Lain. *tzbinfo*. © Copyright *Topinfo s.r.o.* . [online]. 20.11.2006 [cit. 2016-09-23]. Dostupné z: <http://www.tzb-info.cz/3688-zpetne-ziskavani-tepla-ve-vetrani-a-klimatizaci-ii>
- [26] *Technika prostředí* . ©*QPRO(2006-2017)*. [online]. [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: <http://www.qpro.cz/ZZT-rekuperace-regenerace>
- [27] Remak. © 2017 *REMAK a.s. | Aira GROUP s.r.o.*. [online]. [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: <http://www.remak.eu/cs/jakym-zpusobem-pracuje-rotacni-vymenik-tepla>
- [28] *Zákony pro lidi.cz*. © *AION CS, s.r.o. 2010-2017*. [online]. [cit. 2016-11-24]. Dostupné z: [https://www.zakonyprolidi.cz/nabidka/cs/2007-361/zneni-20080101#p56_p56-3\(na%C5%99%C3%ADzen%C3%ADm%20vl%C3%A1dy%20%C4%8D.361/2007%20Sb.\)](https://www.zakonyprolidi.cz/nabidka/cs/2007-361/zneni-20080101#p56_p56-3(na%C5%99%C3%ADzen%C3%ADm%20vl%C3%A1dy%20%C4%8D.361/2007%20Sb.))

- [29] NOVÁK Jiří. *Vzduchotěsnost obvodových plášťů budov*. Praha: Grada Publishing, 2008. ISBN 978-80-247-1953-5.
- [30] Rigips Saint-Gobain. 2015-2017 © Rigips. [online]. [cit. 2016-08-28]. Dostupné z: www.rigips.cz
- [31] HUDEC Mojmír, Blanka Johanisová, Tomáš Mansbart. *Pasivní domy z přírodních materiálů*. Praha: Grada Publishing, 2013. ISBN 978-80-247-4243-4.
- [32] Ing. Jan Růžička, Ph.D. tzbinfo. © Copyright Topinfo s.r.o. 2001-2017. [online]. 27.8.2012 [cit.2016-08-25]. Dostupné z: <http://stavba.tzbinfo.cz/obalove-konstrukce-nizkoenergetickych-staveb/8974-pozarni-odolnost-obvodovych-sten-pro-pasivni-domy-s-vyuzitim-slamenych-baliku-jako-tepelne-izolace>
- [33] Ekopanely . Copyright ©2016 EKOPANELY SERVIS s.r.o. [online]. [cit. 2016-08-25]. Dostupné z: <http://www.ekopanely.cz/>
- [34] Dřevostavitel Online svět dřevostaveb. [online]. 19.5.2014 [cit.2016-08-25]. Dostupné z: <http://www.drevostavitel.cz/clanek/konopna-izolace>
- [35] Zuzana Mathauserová. Stavebnictví3000.cz. Vega společnost s ručením omezeným. [online]. 2.8.2006 [cit.2016-11-29]. Dostupné z: <http://www.stavebnictvi3000.cz/clanky/pozadavky-na-vnitri-prostredi-budov/>
- [36] Rýmařovské domy . © 2017, RD Rýmařov s.r.o. . [online]. [cit. 2016-09-14]. Dostupné z: <http://www.rdrymarov.cz/>
- [37] Insowool. [online]. [cit.2016-09-14]. Dostupné z: <http://www.insowool.cz/>
- [38] American house styles, [online]. [cit.2016-09-14]. Dostupné z: <https://www.americkedrevostavby.cz/>
- [39] SLANINA Petr. *Difúzní vlastnosti materiálů z pohledu nových tepelně technických norem* [online]. 2005. [cit. 2017-01-03]. ISBN . Dostupné z: http://slanina.cz/publikace/files/14_slanina_difuzni_vlastnosti_materialu_z_pohledu_novych_tepelne_tech_nickych_norem.pdf

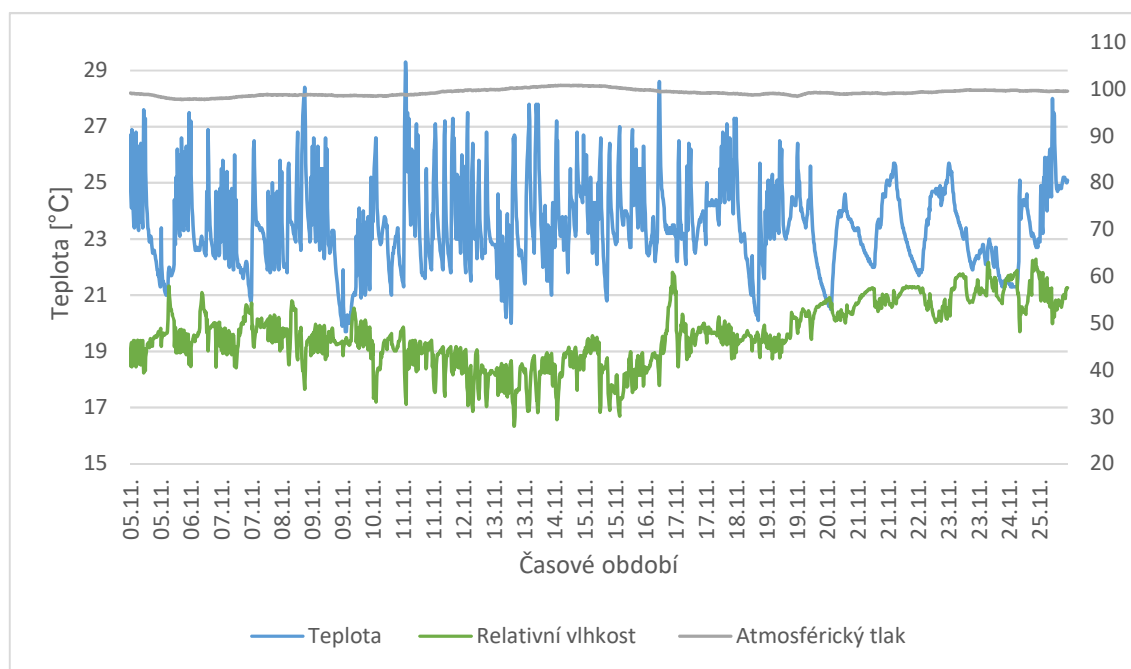
17 Seznam použitých zkratk a symbolů

ADMD	asociace dodavatelů montovaných domů	
Two by four	rozměr prvku v sloupkové dřevostavbě (2x4 palce)	
DO Rýmařov	difúzně otevřená skladba RD Rýmařov	
DU Rýmařov	difúzně uzavřená skladba RD Rýmařov	
DO Diffuwall	difúzně otevřená skladba Insowool Diffuwall Economy plus	
DU American	difúzně uzavřená American house styles	
U_{pas}	součinitel prostupu tepla pro pasivní domy	$W/m^2.K$
$M_{c,a}$	množství zkondenzované vodní páry	$kg/m^2,rok$
$M_{ev,a}$	množství vypařitelné vodní páry	$kg/m^2,rok$
d	tloušťka	m
λ	součinitel difúzní vodivosti	$W/m.K$
q	hustota tepelného toku	W/m^2
θ	teplota	K
R	<i>tepelný odpor konstrukce</i>	$m^2.K/W$
$\vec{\nabla}\theta$	gradient teploty	K
j	hustota difúzního toku	$mol/m^2.s$
c	koncentrace	mol/m^3
D	difúzní koeficient	m^2/s
$G_{k,N}$	požadovaná hodnota celoročního množství zkondenzované vodní páry uvnitř konstrukce	$kg/m^2.a$
P	parciální tlak plynu	Pa
δ	součinitel difúzní vodivosti	$kg/m.s.Pa$
p_{sat}	parciální tlak nasycené vodní páry	Pa
Z_p	difúzní odpor	m/s
μ	faktor difúzního odporu	-
φ	relativní vlhkost	%
p_v	parciální tlak vodní páry ve vzduchu	Pa

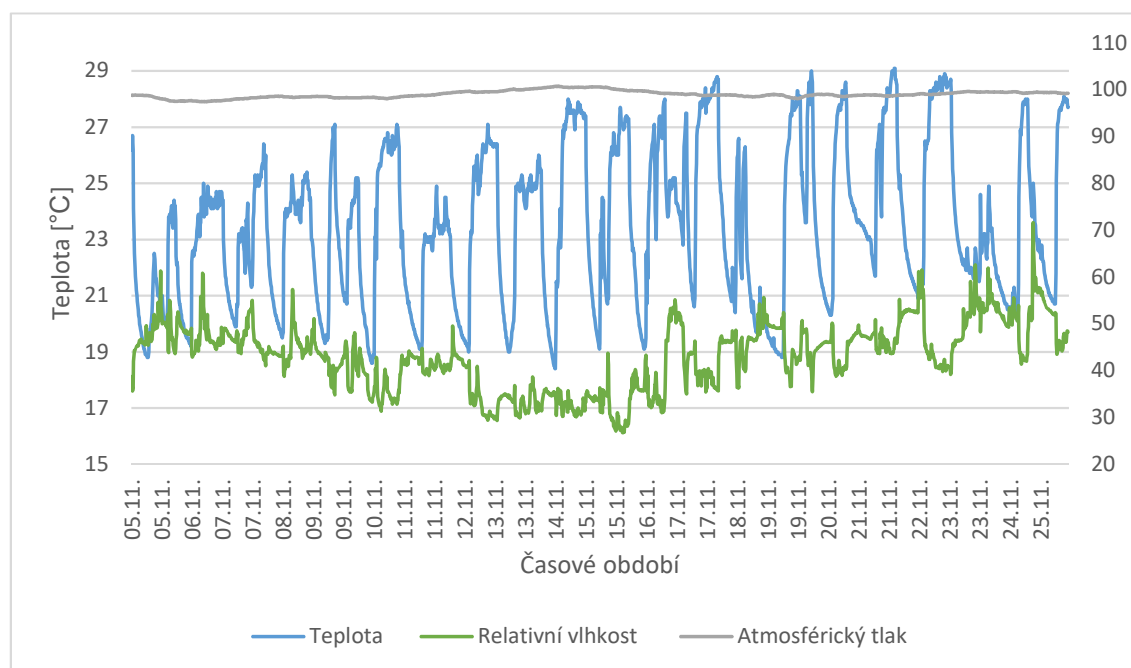
t_o	operativní teplota	°C
rh	relativní vlhkost	%
t_r	střední radiační teplota	°C
t_a	teplota vzduchu	°C
v_a	rychlost proudění vzduchu	m/s
N	teplotní difúzní funkce	s ⁻¹
V	průtok vzduchu	m ³ /h
n	intenzita výměny vzduchu	h ⁻¹
i	součinitel průvzdušnosti spáry	m ³ s ⁻¹ /m.Pa ⁿ
Δp	rozdíl tlaku vyvolaný rozdílem teplot a působením větru	Pa
l	délka spáry	m
$n_{min,N}$	doporučená nejnižší intenzita výměny vzduchu v místnosti	h ⁻¹
n_{50}	intenzita výměny vzduchu při tlakovém rozdílu 50 Pa	h ⁻¹

18 Přílohy

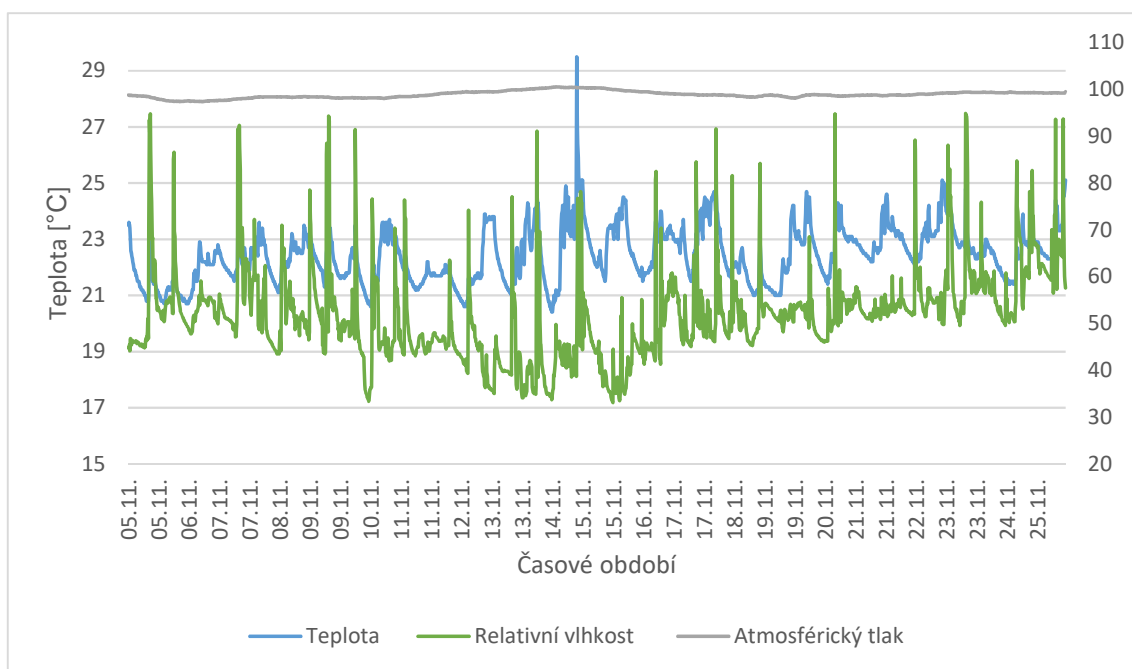
18.1 Experimentální měření mikroklimatu



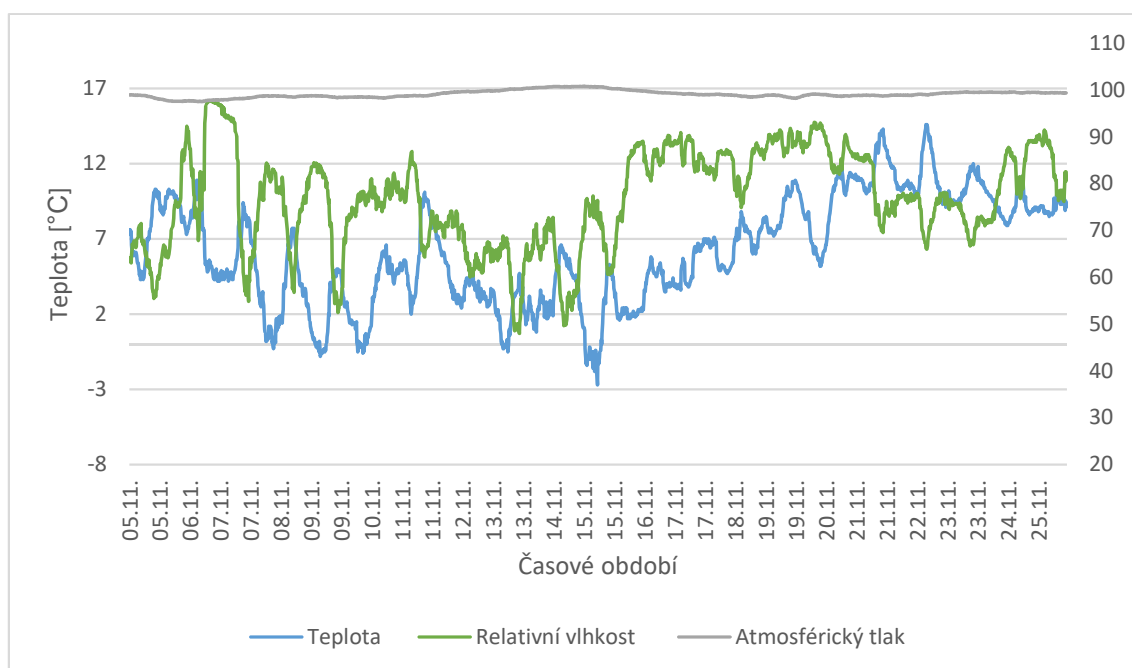
Graf 40 Složky mikroklimatu v pokoji Brno



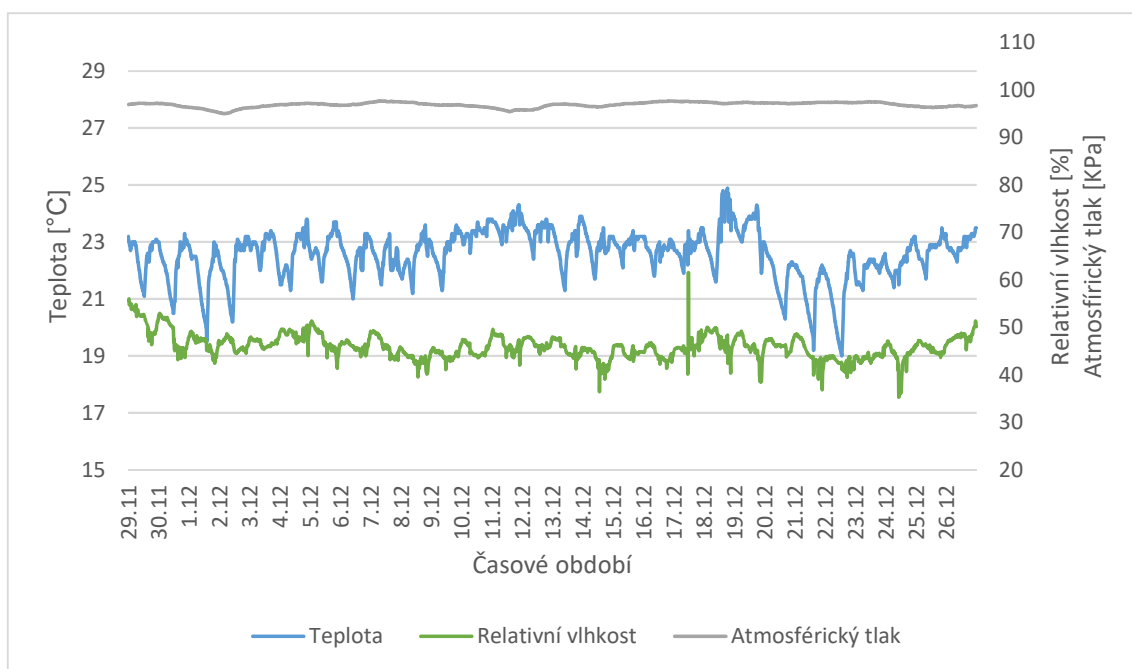
Graf 41 Složky mikroklimatu v obývacím pokoji Brno



Graf 42 Složky mikroklimatu v koupelně Brno

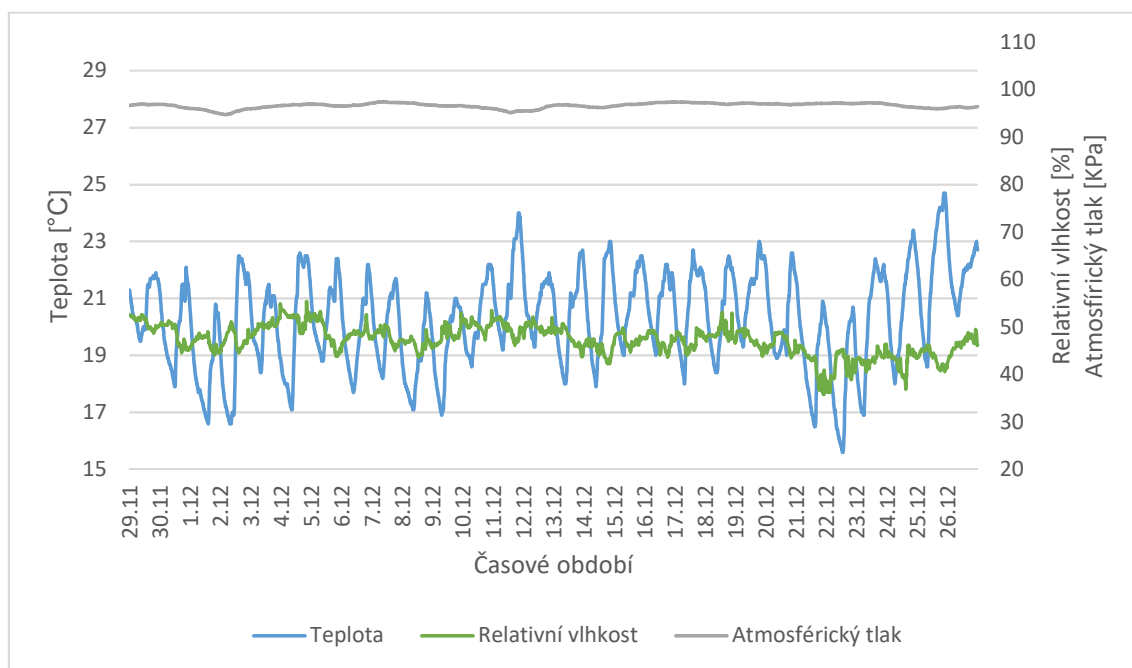


Graf 43 Klimatické podmínky v exteriéru Brno

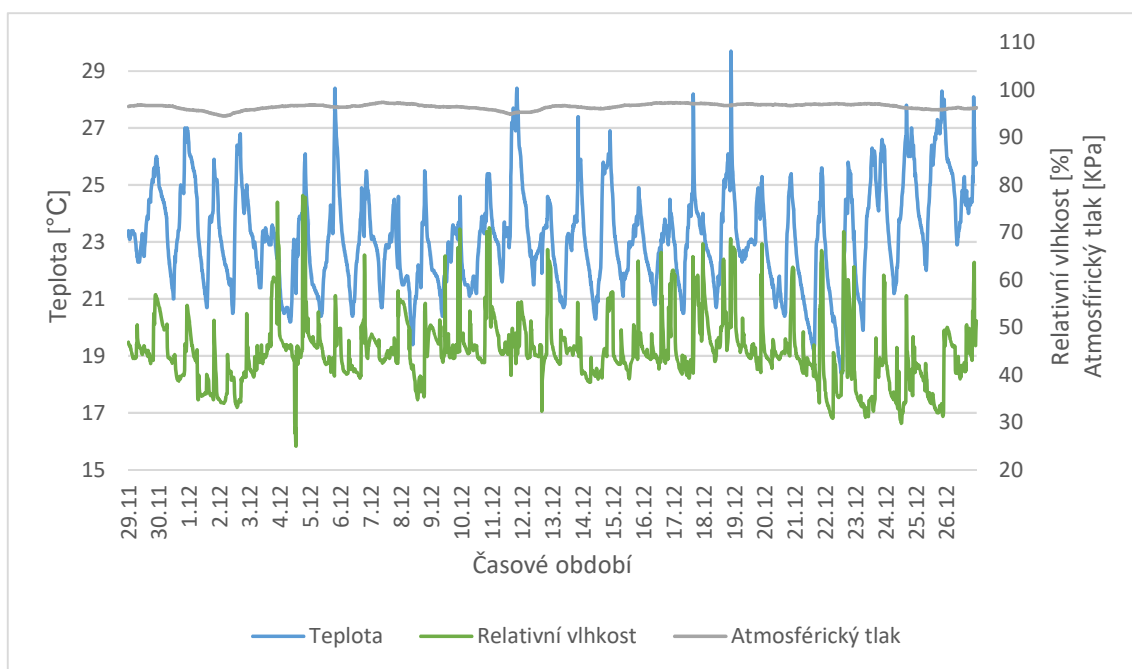


Graf 44 Složky mikroklimatu v pokoji Kyžlířov

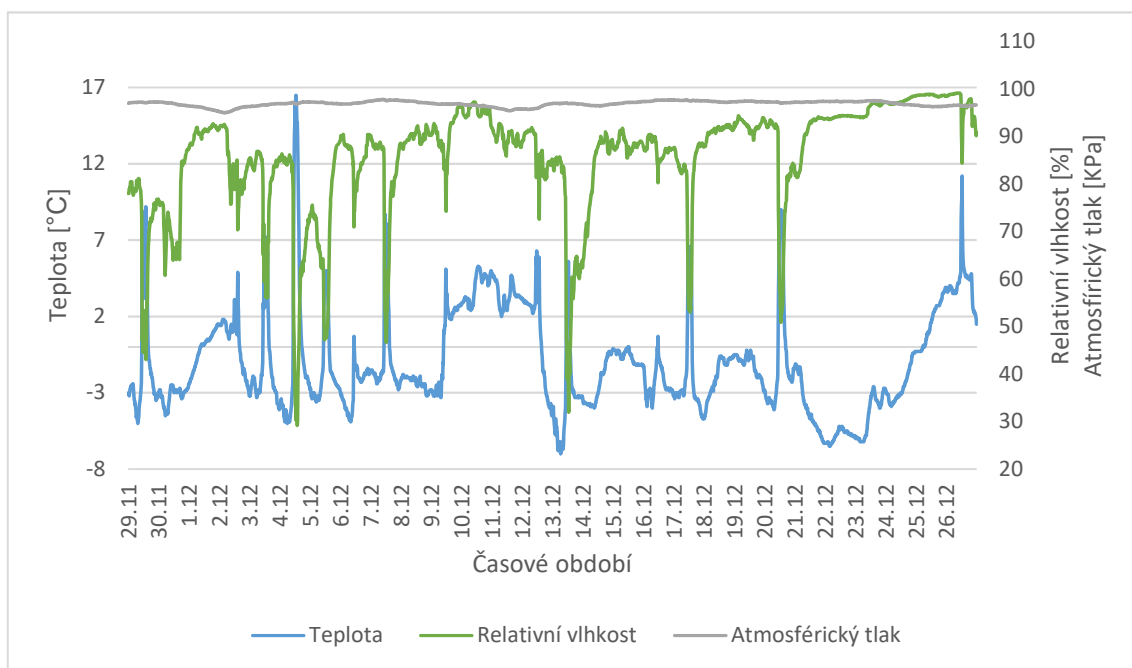
7



Graf 45 Složky mikroklimatu v obývacím pokoji Kyžlířov

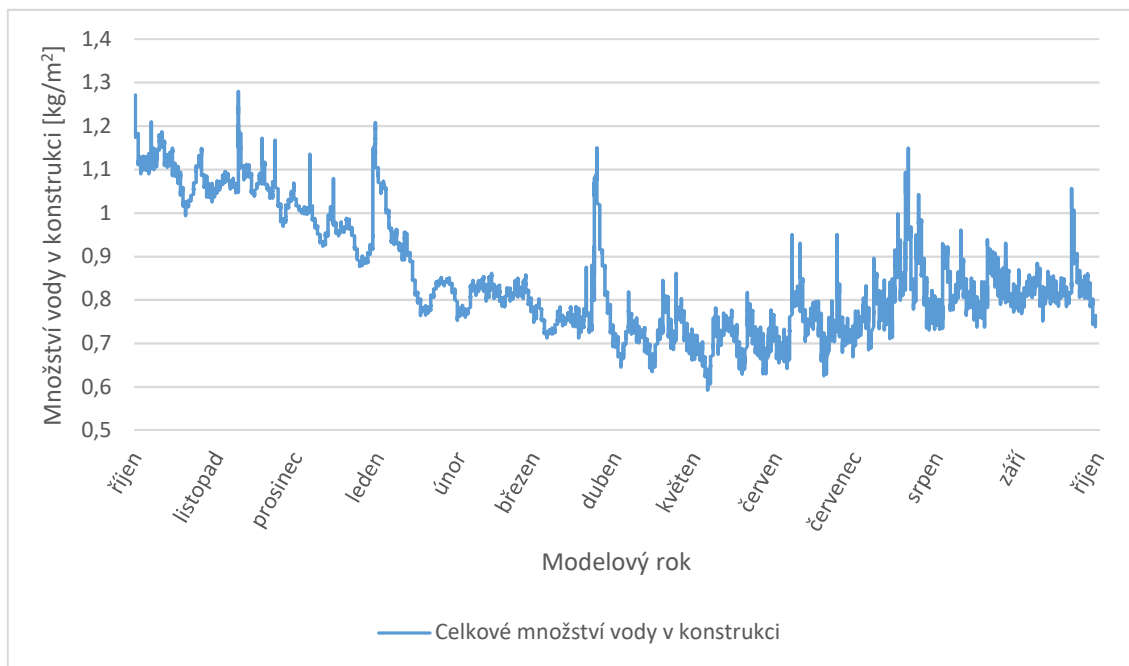


Graf 46 Složky mikroklimatu v koupelně Kyžlířov

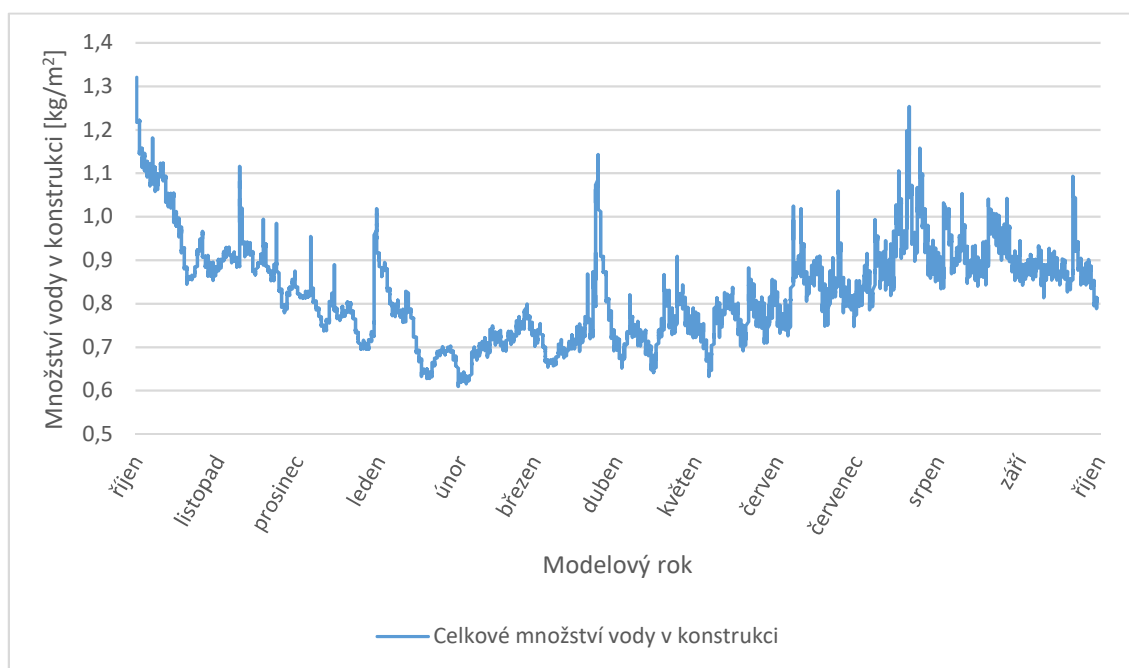


Graf 47 Klimatické podmínky v exteriéru Kyžlířov

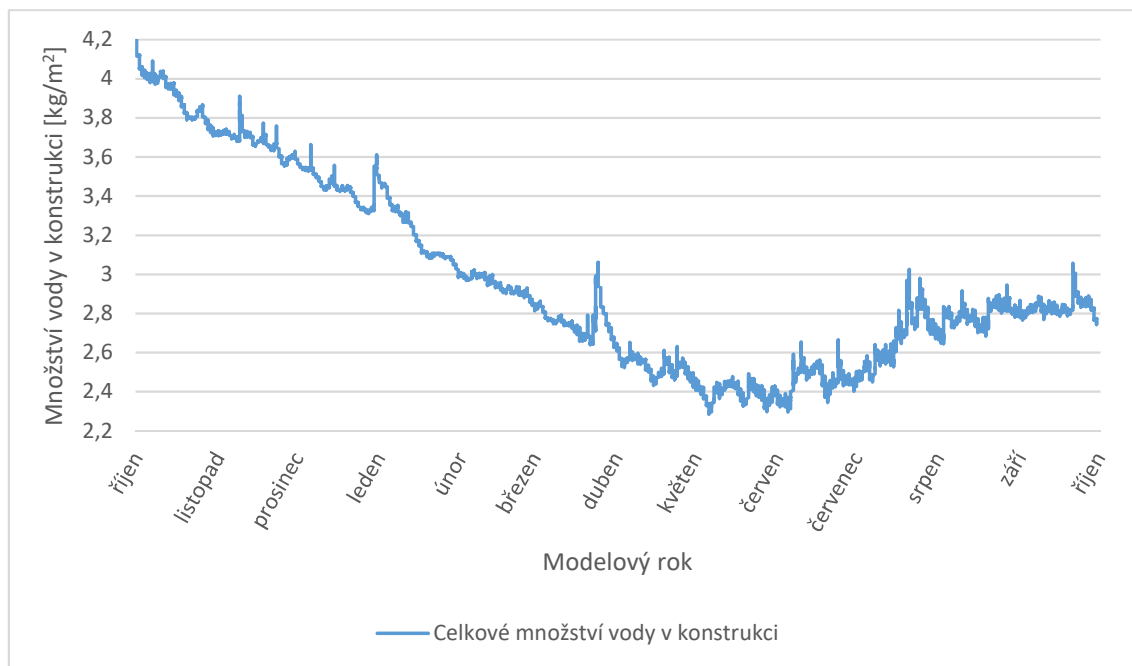
18.2 Numerické analýzy konstrukcí



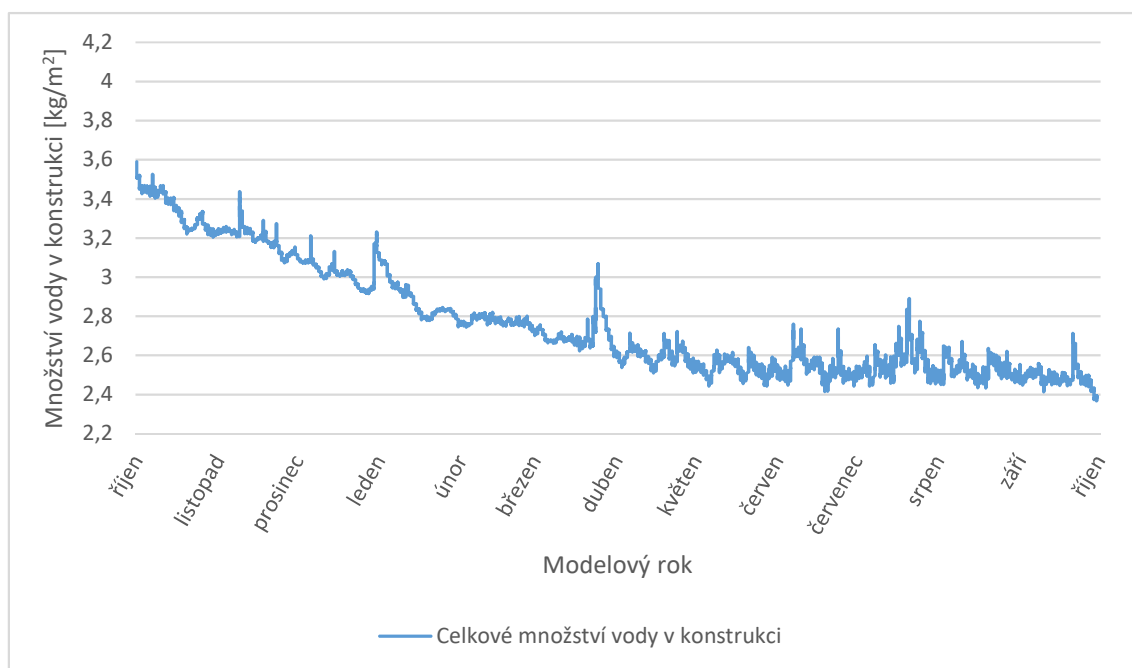
Graf 48 Celkové množství vody v konstrukci DU Rýmařov



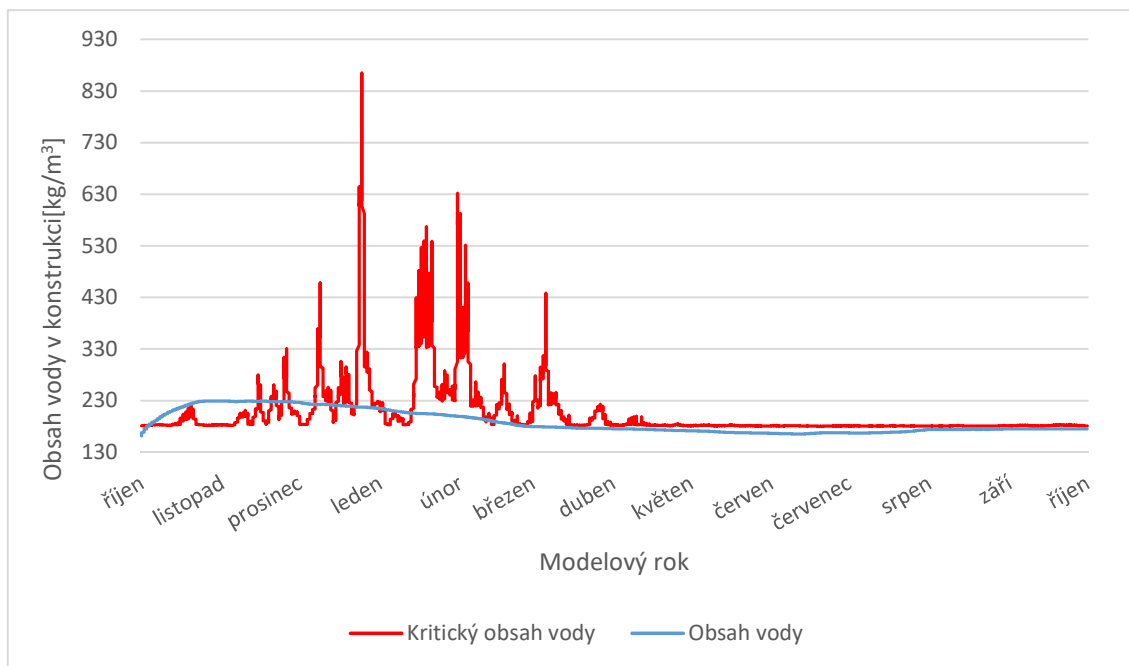
Graf 49 Celkové množství vody v konstrukci DO Rýmařov



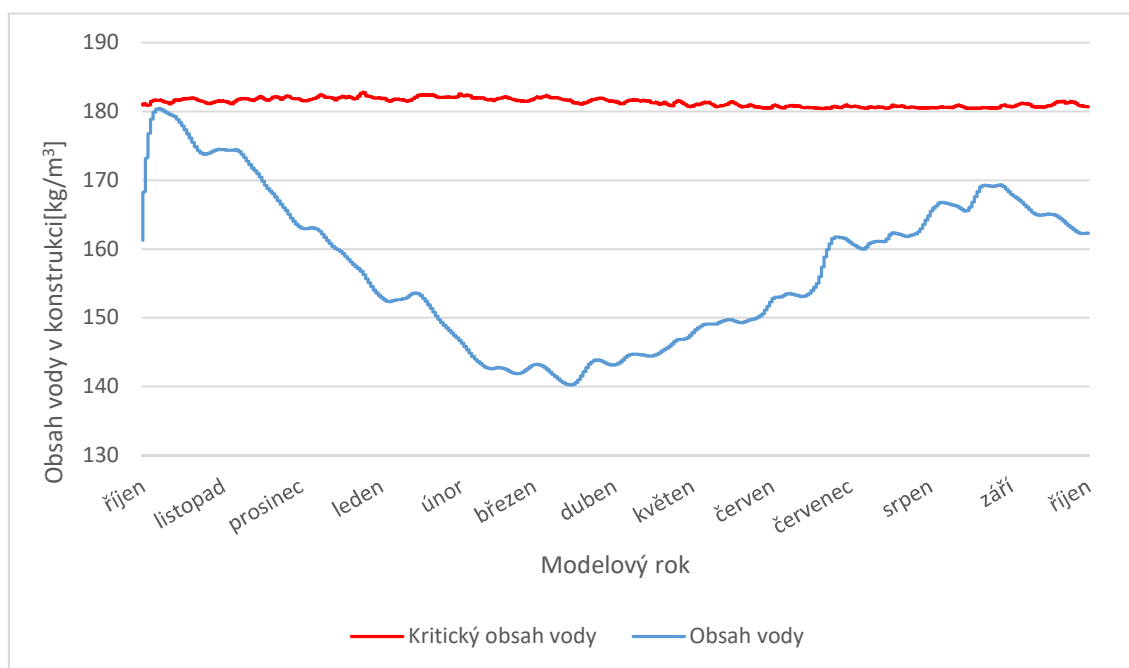
Graf 50 Celkové množství vody v konstrukci DO Diffuwall



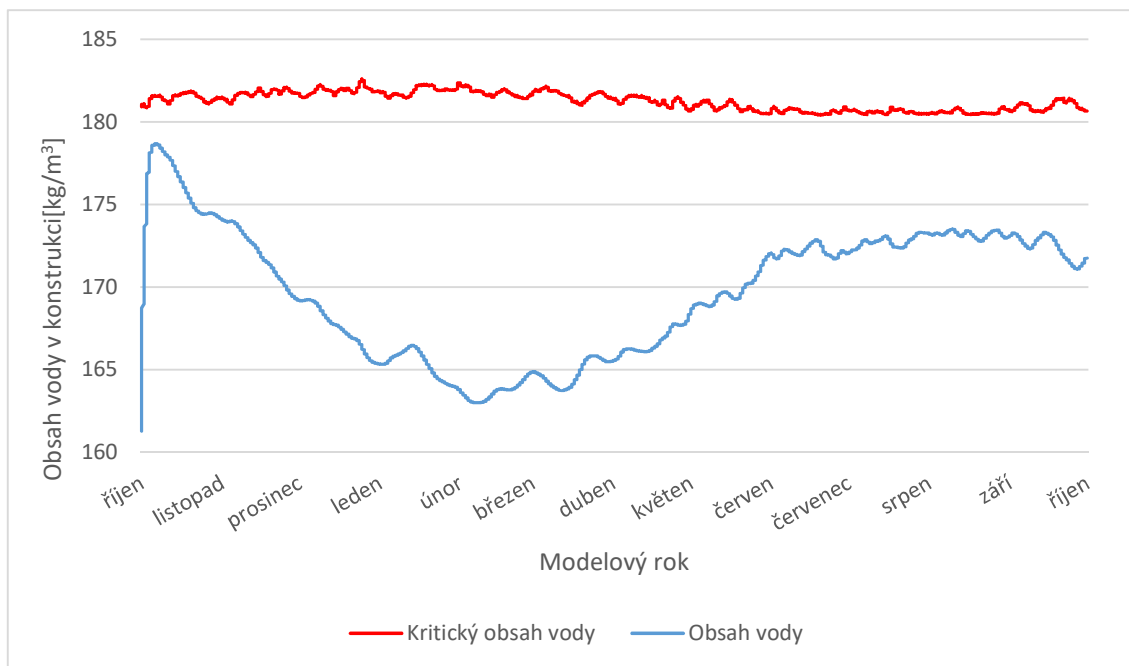
Graf 51 Celkové množství vody v konstrukci DU American



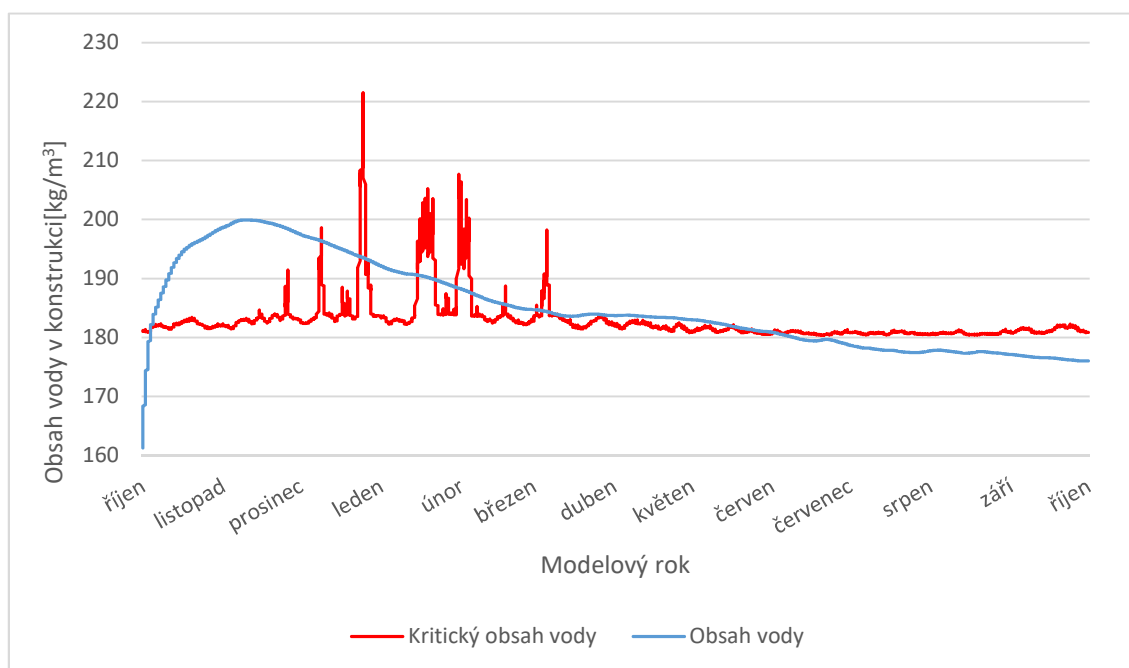
Graf 52 Analýza růstu plísní konstrukce Diffuwall monitorovací bod 2



Graf 53 Analýza růstu plísní konstrukce Diffuwall monitorovací bod 3



Graf 55 Analýza růstu plísní konstrukce Diffuwall monitorovací bod 4



Graf 54 Analýza růstu plísní konstrukce American monitorovací bod 1